

**Frank Denk**

**Elektromagnetische Einspritzventile für Ottomotoren**



# **Elektromagnetische Einspritzventile für Ottomotoren**

Ein Beitrag zur Charakterisierung  
und Systemintegration  
schnellschaltender Aktuatoren

Frank Denk



Universitätsverlag Ilmenau  
2018

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die dieser Publikation zugrundeliegende Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau im Jahr 2018 unter dem Titel „Beitrag zur Charakterisierung und Systemintegration schnellschaltender elektromagnetischer Aktuatoren - insbesondere Einspritzventile für Ottomotoren“ als Dissertation vorgelegen.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISBN** 978-3-86360-176-8 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018100029

---

Titelgrafik: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2017 im Bereich Forschung und Entwicklung des Geschäftsbereiches „Engine Systems“ bei der Continental Automotive GmbH.

Ich möchte an dieser Stelle Herrn F. Lohrenz und Herrn Dr. G. Rösel dafür danken, dass sie durch ihre Unterstützung diese Arbeit ermöglichten.

Ganz besonders möchte ich Herrn AR PD Dr. T. Ströhla als Betreuer dieser Arbeit dafür danken, dass er durch seine technische Unterstützung und seinen fachlichen Rat wesentlich dazu beigetragen hat, die vorliegende Dissertation zu realisieren.

Darüber hinaus danke ich den Kollegen Herrn Dr. J. Paggel sowie Herrn Dr. N. Belyaev für die wissenschaftlichen Diskussionen und konstruktiven Anregungen.

Die Geduld und die Rücksicht, die meine Frau Michaela und meine Kinder Philipp, Paula und Franka zeigten, war unbeschreiblich groß.



## **Kurzzusammenfassung**

Der gesetzlich zulässige Schadstoffausstoß von Verbrennungsmotoren erfordert die Entwicklung neuer Ansteuerstrategien von Kraftstoffeinspritzventilen. Die vorliegende Arbeit untersucht das einspritzrelevante System aus Elektronik, Software, Einspritzventil sowie Hydraulik und entwickelt neue elektromagnetische Methoden zur Optimierung des hydraulischen Einspritzvorgangs. Insbesondere die dynamischen Vorgänge des hydraulischen Öffnens und des hydraulischen Schließens bilden den Schwerpunkt der Untersuchungen.

Auf Basis der Maxwellschen Gleichungen wird dargestellt, dass das dynamische Verhalten des Einspritzventils vor allem durch die Reluktanzkraft erfolgt. Es wird gezeigt, dass die elektromagnetischen Ansteuerparameter Spulenspannung und Spulenstrom bei einem Einspritzventil einen signifikanten Einfluss auf den hydraulischen Einspritzvorgang haben. Die Eigenschaft, dass die mechanisch-hydraulische Reaktion magneto-elektrisch auf die Ansteuerung zurückwirkt, wird genutzt, um den Einspritzablauf zu analysieren.

Durch die Parametervariation der Ansteuerung und der Analyse der sensorischen Rückmeldung wird ein robustes hydraulisches Öffnen, ein sicheres hydraulisches Offenhalten und ein schnelles hydraulisches Schließen mit der dafür benötigten elektrischen Energie abgestimmt und optimiert.

Mit speziellen Verfahren wird der magnetische Fluss des Einspritzventils berechnet. Diese zeigen eine im Kraftfahrzeugbereich neue Möglichkeit der effizienten Abstimmung des elektrischen Energieeintrags sowie der hydraulischen Reaktion und bieten einen Ausblick in zukünftige Regelkonzepte.

Diese Arbeit lehnt sich streng an die Umgebungsbedingungen in einem heutigen elektrischen Bordnetz an. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Ergebnisse technisch in Serienapplikationen umzusetzen.

## **Abstract**

The legal emission reduction of combustion engines requires new driver strategies for solenoid direct injection valves. Based on these requirements new electromagnetic concepts will be developed to improve the injection process. Aim of this work is to analyse the whole injection system with subsystems electronic, software, injector and hydraulic. Focus is the hydraulic opening and hydraulic closing process.

Shown by deriving of the Maxwell Equations the reluctance force is the primary electromagnetic force of the injection valve. The work identifies the injector voltage and injector current as main influence parameters in case of timing and accuracy of the fuel injection. The mechanical movement induces an electromagnetic feedback signal. This signal is in relation to the injection rate.

This thesis demands a robust process for hydraulic opening, holding and closing. The optimization of the electrical parameters and the feedback signal acquisition reduces electrical energy consumption.

The calculation of the magnetic flux establishes a new advanced feature in automotive applications. The method is used for investigate and optimize the energetic interaction between the electronic and the injector related to new closed loop control strategies.

Basic conditions of this thesis are strictly related to real environment behaviour of the car board net. Therefore, technical realization in combustion engine projects is feasible.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Gesetzliche Vorgaben .....	1
1.2	Einfluss auf das Einspritzsystem.....	8
1.3	Ziel der Untersuchung.....	10
<b>2</b>	<b>Technik des Einspritzsystems .....</b>	<b>13</b>
2.1	Zeitliche Entwicklung .....	13
2.2	Komponentenverbund .....	16
2.3	Arbeitsbereich des Einspritzventils.....	17
2.4	Einspritzventil ohne Ankerfreiweg .....	19
2.4.1	Funktionelle Clusterung .....	19
2.4.2	Hydraulischer Öffnungsvorgang .....	20
2.4.3	Hydraulischer Schließvorgang .....	21
2.5	Einspritzventil mit Ankerfreiweg.....	22
2.5.1	Funktionelle Clusterung .....	22
2.5.2	Hydraulischer Öffnungsvorgang .....	23
2.5.3	Hydraulischer Schließvorgang .....	24
2.6	Elektronik.....	25
2.6.1	Konzeptübersicht.....	25
2.6.2	Prinzip des Stromreglers .....	25
2.6.3	DC-DC-Wandler .....	28
2.6.4	Spulenspannungsprofil und Spulenstromverlauf .....	29
2.7	Funktionen der Software .....	30
2.8	Elektrische Signalinformationen.....	31
2.9	Normen und Standards.....	34
<b>3</b>	<b>Physikalische Formulierung.....</b>	<b>37</b>
3.1	Elektromagnetische Kräfte.....	37
3.2	Magnetkräfte des Einspritzventils.....	44
3.3	Elektrische Beschreibung.....	46
3.3.1	Fremderregung .....	48
3.3.2	Eigenerregung .....	51
3.3.3	Sonderfall Batterie nach Boostphase .....	56
3.4	Magnetische Beschreibung .....	57
3.4.1	Induktionsanteil des Stromgradienten.....	59

3.4.2 Induktionsanteil der Ankerbewegung.....	60
3.5 Leitfähigkeit des Einspritzventils .....	60
<b>4. Messsysteme und Auswertung.....</b>	<b>61</b>
4.1 Prüfaufbauten .....	61
4.2 Magnetische Flussmessung .....	64
4.3 Auswertung .....	69
4.4 Simulation .....	70
<b>5. Hydraulisches Öffnen.....</b>	<b>73</b>
5.1 Beschreibung .....	73
5.2 Definition der Untersuchungen .....	75
5.3 Einfluss der Boostparameter .....	76
5.4 Differenzpulsverfahren.....	86
5.5 Einspritzventil mit variablem Hub .....	91
5.6 Freilauf Masse oder Batterie .....	98
5.7 Doppelpulsverfahren .....	104
5.8 Quasistatischer Betrieb.....	109
<b>6. Hydraulisches Schließen .....</b>	<b>113</b>
6.1 Beschreibung.....	113
6.2 Definition der Untersuchungen .....	114
6.3 Abschaltspannung ohne Bewegung.....	115
6.4 Abschaltspannung mit Bewegung.....	118
6.5 Einfluss des Haltestroms .....	122
6.6 Einfluss der Abschaltspannung .....	125
6.7 Abschaltstrom mit Bewegung .....	127
<b>7. Zusammenfassung.....</b>	<b>131</b>
<b>8. Anhang.....</b>	<b>135</b>
8.1 Einfluss der Boostparameter .....	135
8.2 Einfluss der Abschaltspannung .....	138
<b>9. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>143</b>

## **Symbole und Abkürzungen**

Physikalische Größen sind mit kursiven Großbuchstaben, Natur- und Materialkonstanten mit kursiven Kleinbuchstaben bezeichnet.

Elektrische Bauelemente und im Zusammenhang genutzte elektrische Größen werden kursiv und bei zusätzlicher Indizierung mit tiefer gestellten Kleinbuchstaben dargestellt.

Abkürzungen und Parameter sind recte beschrieben.

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	-
COSI	Controlled Solenoid Injection	-
CVO	Controlled Valve Operation	-
DI	Direct Injection	-
DTC	Duty Cycle	-
ECE	Economic Commision for Europe	-
ECU	Engine Control Unit, Motorsteuergerät	-
EG	Europäische Gemeinschaft	-
EOI	End Of Injection	-
EPA	Enviromental Protection Agency	-
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft	-
GND	Elektrisches Potential Ground, Masse, Minuspol der Batterie	-
FET	Feldeffekt Transistor	-
ICLC	Injector Closed Loop Control	-
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	-
RAM	Random-Access Memory	-

---

SOI	Start Of Injection	-
I_HOLD0_HIGH	Stromobergrenze erste Haltephase	A
I_HOLD0_HYST	Stromhysterese erste Haltephase	A
I_HOLD1_HIGH	Stromobergrenze zweite Haltephase	A
I_HOLD1_HYST	Stromhysterese zweite Haltephase	A
I_PK	Peakstrom	A
T <sub>i</sub>	Injection Time, Elektrische Einspritzzeit	s
<i>A</i>	Vektorpotential	V s / m
<i>B</i>	Magnetische Flussdichte	V s / m <sup>2</sup>
<i>C<sub>cap</sub></i>	Kapazität des Kondensators	A s / V
<i>D</i>	Elektrische Flussdichte	A s / m <sup>2</sup>
<i>D<sub>clamp1</sub></i>	Clampingdiode 1	-
<i>D<sub>clamp2</sub></i>	Clampingdiode 2	-
<i>D<sub>GND</sub></i>	Freilaufdiode gegen Ground, Masse	-
<i>E</i>	Elektrische Feldstärke	V / m
<i>E<sub>boost</sub></i>	Boostenergie	J
<i>E<sub>cap</sub></i>	Elektrische Feldenergie	J
<i>E<sub>mag</sub></i>	Magnetische Feldenergie	J
<i>F</i>	Kraft	N
<i>H</i>	Magnetische Feldstärke	A / m
<i>I</i>	Strom	A
<i>I<sub>boost</sub></i>	Peakstrom	A
<i>J</i>	Stromdichte	A s / m <sup>2</sup>
<i>L</i>	Magnetische Induktivität	A s / V m
<i>l</i>	Länge	m
<i>n</i>	Drehzahl	1 / min

---

$p$	Druck	bar
$P_{DC-DC}$	Mittlere Leistung DC-DC-Wandler	W
$R$	Elektrischer Widerstand	Ohm
$t_{boost}$	Boostzeit	s
$T_{HS\_bat}$	Highside FET Batterie	-
$T_{HS\_boost}$	Highside FET Boost	-
$T_{LS1}$	Lowside FET 1	-
$T_{LS2}$	Lowside FET 2	-
$T_{period}$	Periodendauer	s
$U_{bat}$	Batteriespannung	V
$U_{boost}$	Boostspannung DC-DC-Wandler	V
$U_{freewheel}$	Freilaufspannung	V
$U_{clamp}$	Clampingspannung	V
$U_Z$	Zustandsspannung	V
$v$	Geschwindigkeit	m / s
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$x$	Abstand	m
$\varepsilon$	dielektrische Leitfähigkeit	As / Vm
$\varepsilon_0$	dielektrische Feldkonstante	$8,85 \cdot 10^{-12}$ As / Vm
$\mu$	magnetische Leitfähigkeit	Vs / Am
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$4 \pi \cdot 10^{-7}$ N / A <sup>2</sup>
$\Psi$	verketteter magnetischer Fluss	Vs



# **1 Einleitung**

## **1.1 Gesetzliche Vorgaben**

Am 20. März 1970 wird im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften die Richtlinie 70/220/EWG oder ECE R15-0 [Eur70] veröffentlicht. Die ECE ist die Institution „Economic Commission for Europe“.

In diesem Amtsblatt sind zum ersten Mal in Europa „Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung“ definiert und festgelegt. Sie begrenzen die Emissionen bestimmter Abgasmengen, die in einem Testfahrszyklus bei Benzinmotoren im Verbrennungsprozess gebildet werden. Dieser Zyklus beschreibt einen simulierten Fahrbetrieb im Stadtverkehr, welcher ab einem definierten Zeitpunkt nach einem Motorkaltstart beginnt.

Messtechnisch erfasst werden dabei die entstehenden Mengen an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. Die Grenzwerte dieser Gase müssen je nach Fahrzeuggewicht unter einer definierten Schwelle liegen, um die Betriebserlaubnis des jeweils getesteten Fahrzeugs erteilt zu bekommen.

Der Fortschritt in der technischen Entwicklung führt dazu, dass im Mai 1974 die erste Richtlinie durch die 74/290/EWG, ECE R15-1 [Eur74] ergänzt wird. Hier werden die Grenzwerte für beide Schadstoffgruppen reduziert.

Im November 1976 erfolgt in der Richtlinie 77/102/EWG, ECE R15-2 [Eur77] die zusätzliche Einführung der messtechnischen Erfassung der Stickstoffemissionen und deren Limitierung auf einen Grenzwert.

Im Zuge des stetig wachsenden Fortschritts im Bereich der Verbrennungsmotoren erfolgt im Juli 1978 in der 78/665/EWG, ECE R15-3 [Eur78] eine weitere Reduzierung der Schadstoffgrenzen aller drei erfassten Verbrennungsgase. Erneutes Herabsetzen der Schadstoffkonzentrationen erfolgt im Juni 1983 in der Richtlinie 83/351/EWG [Eur83]. Zusätzlich

wird hier die Summe an Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden in einen Grenzwert zusammengefasst.

Die Richtlinie 88/76/EWG vom Dezember 1987 [Eur88] beinhaltet die nächste Reduzierung der Grenzwerte der Masse an Kohlenmonoxid und der Summe aus den Mengen der Kohlenwasserstoffe und Stickoxide.

Alle bisherigen Richtlinien definieren den Beginn des Messzyklus nach Motorkaltstart und einem Ablauf einer Leerlaufperiode von 40 Sekunden.

Abb. 1 stellt diesen Standardfahrzyklus über das gesamte Geschwindigkeitsprofil graphisch dar. Es sind drei zeitlich aneinander gereihte Fahrprofile mit dazwischenliegenden Fahrzeugstillstandzeiten abgebildet.

In den einzelnen Fahrprofilen sind die Maximalgeschwindigkeiten mit einer definierten Toleranzgrenze einzuhalten. Die Maximalgeschwindigkeit wird nach jedem Fahrprofil erhöht.

Der Moment des Gangwechsels innerhalb des Fahrprofils und der dafür notwendige Kuppelungsvorgang sind zeitlich sowohl beim Beschleunigen als auch beim Abbremsen festgelegt.

Das gesamte Fahrprofil stellt einen typischen Stadtfahrzyklus nach.



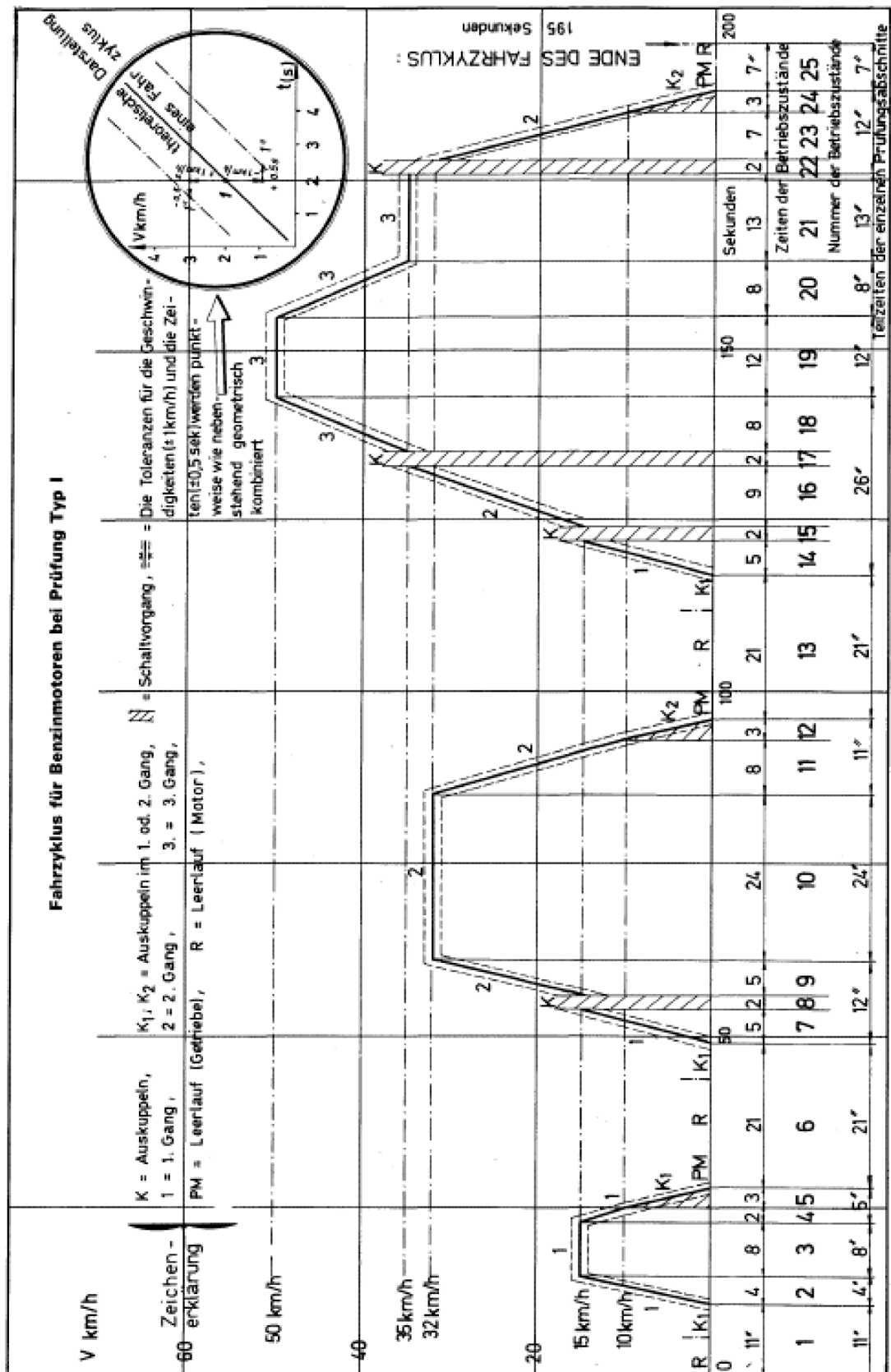


Abbildung 1: Standardfahrzyklus zur Nachbildung einer Stadtfahrt aus [Eur70]

Die Richtlinie 88/76/EWG führt zudem die Möglichkeit ein, alternativ als Messzyklus den amerikanischen EPA-Zyklus (EPA = Environmental Protection Agency) einzusetzen.

Dieser Zyklus in der Abb. 2 berücksichtigt bei den einzuhaltenden Grenzwerten auch die jeweils zum Einsatz kommende Katalysatortechnologie. Im Vergleich zum europäischen Standardfahrzyklus beinhaltet der EPA-Zyklus zeitlich einen längeren und komplexeren Zyklus hinsichtlich des Fahrprofils.

Mehrmals hintereinander wechselnde Fahrzeuggeschwindigkeiten variieren unterschiedlich in ihrem Endwert und erreichen höhere Werte. Zusätzlich sind Phasen implementiert, in denen das Fahrzeug zwischenzeitlich zum Stillstand kommt.

Im Juni 1991 wird durch die Richtlinie 91/441/EWG [Eur91], auch EURO 1 genannt, in Europa ein verbessertes Prüfverfahren eingeführt, welches einen weiteren Test beinhaltet, der einer Fahrbedingung außerhalb geschlossener Ortschaften entspricht. Dieser Fahrzyklus wird auch als NEFZ (NEFZ = Neuer Europäischer Fahr Zyklus) bezeichnet. In der Abb. 3 ist erkennbar, dass der NEFZ zeitlich betrachtet den Standardfahrzyklus dreimal wiederholt, und sich diesen Profilen das Profil der Überlandfahrt anschließt. Die definierten Emissionen an Schadstoffen von Kohlenmonoxid sowie die Summe von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden unterliegen wiederum strengeren Grenzlimits.

Im Oktober 1996 ändert die Richtlinie 96/69/EG, EURO 2 [Eur96] grundlegend den Beginn der Messung der Ermittlung der Schadstoffe. Die Messung erfolgt sofort mit dem Startvorgang des Motors, die bisherige Leerlaufphase von 40 Sekunden entfällt. Zusätzlich werden verfeinerte Fahrzeugklassen und Fahrzeuggruppen eingeführt, deren Schadstoffgrenzwerte wiederum abhängig von der jeweiligen Fahrzeugmasse sind.

Es folgen zeitlich gesehen weitere Verordnungen und Maßnahmen, die Richtlinie 98/69/EG [Eur98], die Richtlinie 715/2007 [Eur07] sowie die Richtlinie 459/2012 [Eur12], die jeweils eine weitere und schrittweise Reduktion der Schadstoffe beinhalten.

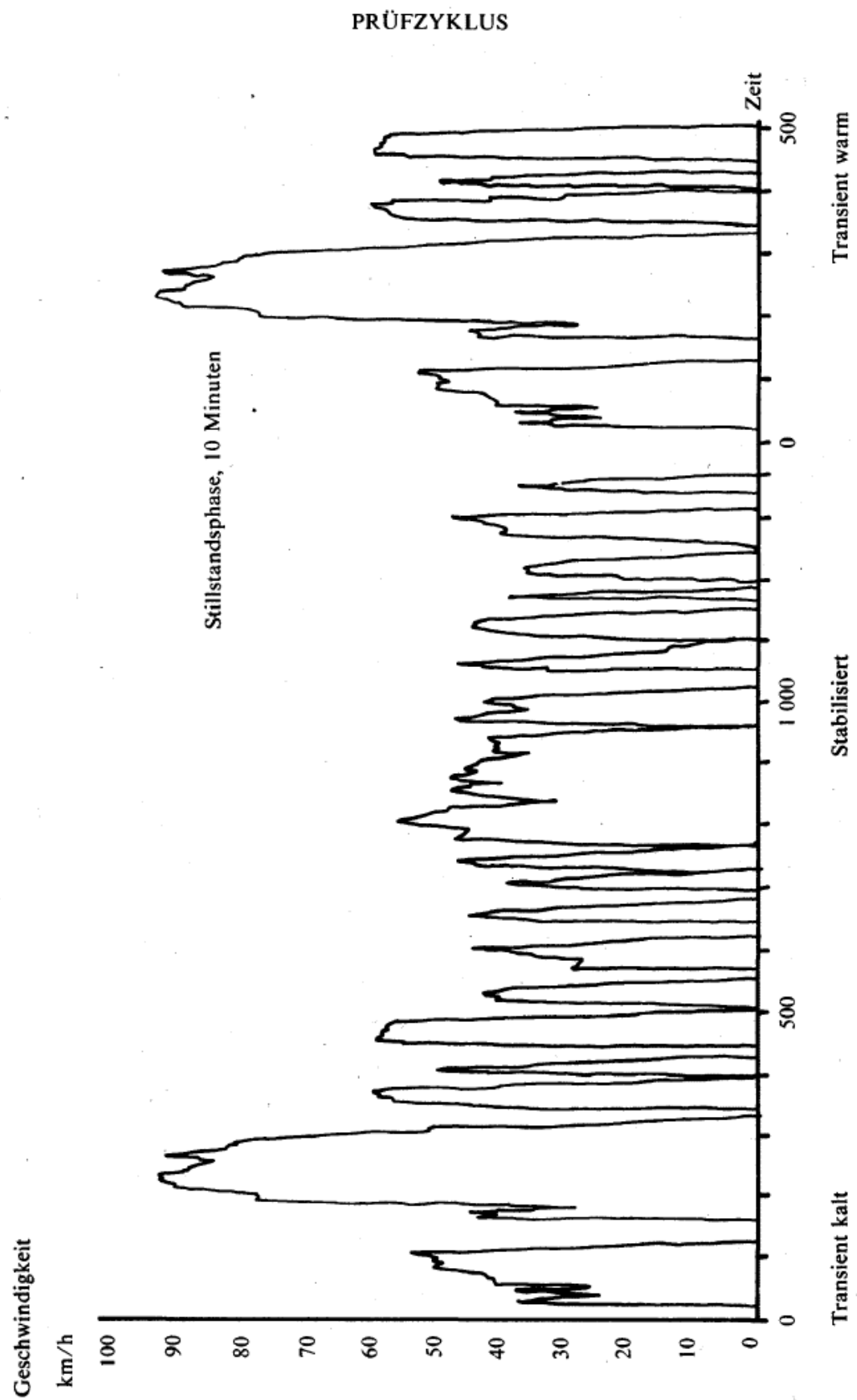


Abbildung 2: EPA-Zyklus aus [Eur88]

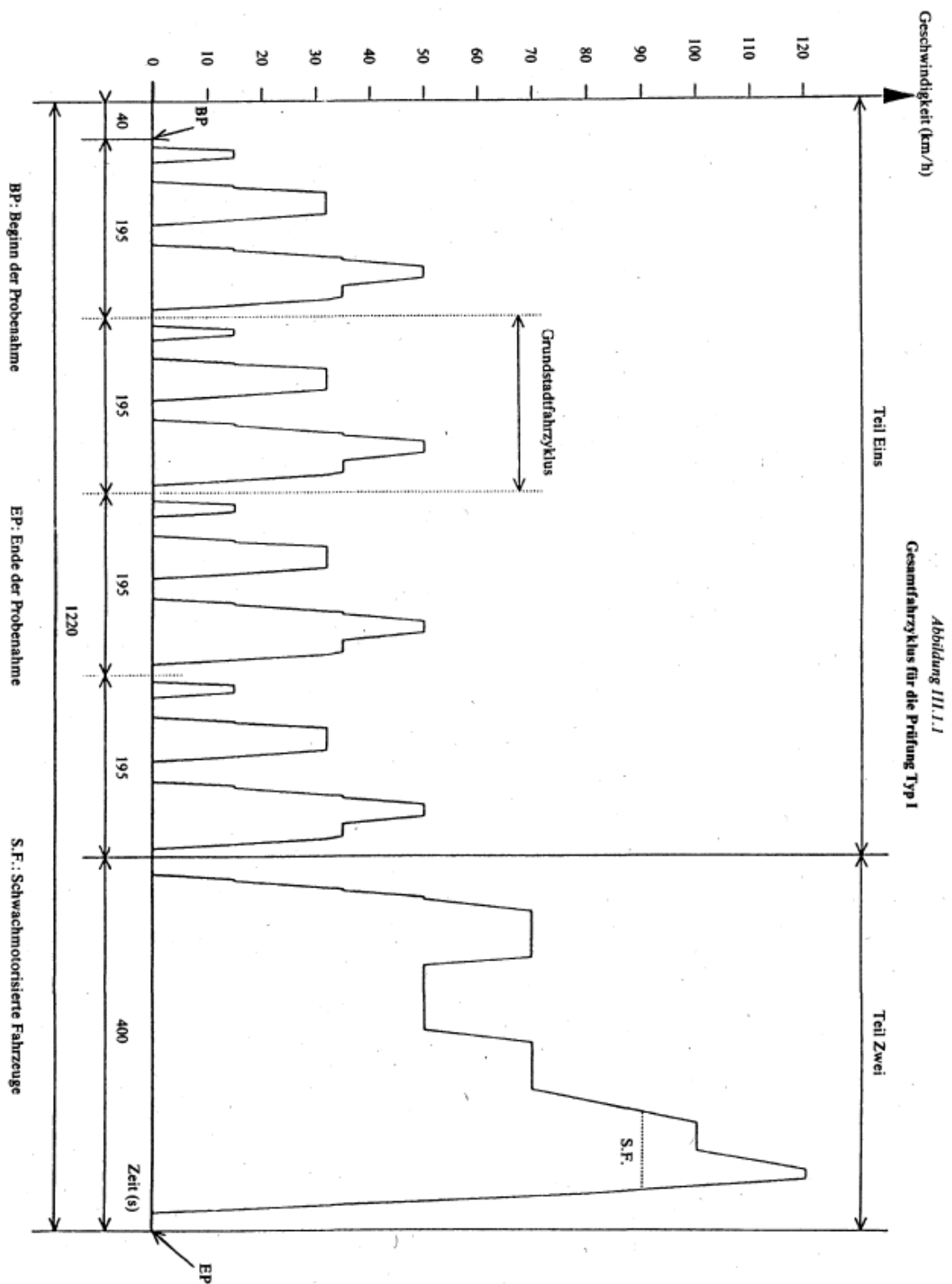


Abbildung 3: Testablauf NEFZ aus [Eur91]

Die Tab. 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der Richtlinien sowie deren Grenzen in den jeweils erfassten Messwerten. Die Angaben beziehen sich auf die Fahrzeugklasse der Personenkraftwagen mit Ottomotor bis zur Norm EURO 6c, die im September 2017 in Kraft tritt.

Datum Richtlinie Norm In- krafttreten	Masse Kohlen- monoxid CO (mg/km)	Kohlen- wasser- stoffe ins- gesamt THC (mg/km)	Nicht Me- than Koh- len-wasser- stoffe NMHC (mg/km)	Masse Stick- oxide NO <sub>x</sub> (mg/km)	Kohlen-was- serstoffe und Stickoxide THC + NO <sub>x</sub> (mg/km)	Partikel- masse PM (mg/km)	Partikel- anzahl PN (#/km)
Okt. 1996 96/69/EG EURO2 ab 1997	2200				500		
Okt. 1998 98/69//EG EURO3 ab 2000	2300	200		150			
Okt. 1998 98/69//EG EURO4 ab 2005	1000	100		80			
Juni 2007 715/2007/EG EURO5 ab Sept. 2009	1000	100	68	60		5	
Mai 2012 459/2012/EG EURO 6 ab Sept. 2017	1000	100	68	60		4,5	6,0 x 10 <sup>11</sup>

**Tabelle 1:** Zeitliche Entwicklung der Art und der Menge an gemessenen Emissionswerten

## 1.2 Einfluss auf das Einspritzsystem

Die sich stetig verschärfenden Schadstoffbegrenzungen und damit auch der stetig reduzierte Kraftstoffverbrauch haben im Bereich des Ottomotors aufgrund der Verbesserung und der Weiterentwicklung des Verbrennungsverfahrens zur Einführung von elektromagnetischen Einspritzventilen geführt. Das elektrisch angesteuerte Einspritzventil liefert hierbei dem Ansaugtrakt des Motors die benötigte Menge an Benzin in zerstäubter Form zu.

Erste Konzepte für diese sogenannten Saugrohr-Einspritzsysteme werden 1973 in den USA realisiert und in der Dissertation von Hong [Hon95] beschrieben. Das erste zuverlässig arbeitende Einspritzventil wird 1975 von der Robert Bosch GmbH auf Basis eines lizenzierten Patents von Stephen [Ste60] von der Bendix Corporation in Serie eingeführt. Die Systeme sind unter dem Namen Benzin-Einspritzsysteme „D-Jetronic“, „L-Jetronic“ und „Motronic“ bekannt.

Durch den weiteren Entwicklungsverlauf der Ottomotoren kommen elektromagnetische Einspritzventile für die Direkteinspritzung (im Englischen Direct Injection = DI) auf den Markt. Diese Einspritzventile tragen die zur Verbrennungsreaktion nötige Menge an Kraftstoff zu definierten Zeitpunkten direkt in den Verbrennungsraum ein.

Untersuchungen im Bereich der Verbrennung zeigen, dass höhere Kraftstoffbetriebsdrücke und mehrere Einspritzvorgänge pro Verbrennungszyklus einen Beitrag zur Erfüllung der sich stetig weiter reduzierenden Schadstoffgrenzen leisten können.

Gegenwärtige Entwicklungsstrategien sind unter anderem auch Konzepte, deren Schwerpunkte in der Detektion und Erfassung der eingespritzten Kraftstoffmenge liegen, um den Verbrennungsvorgang weiter zu optimieren.

Die Funktionalität bei der Continental Automotive GmbH, die die obigen Anforderungen umsetzt, trägt nach [Con15] die Bezeichnung COSI (COSI = Controlled Solenoid Injection). Der SAE-Beitrag von Christoffel [Chr11] erläutert den Einfluss der Funktionalität COSI auf die Verbesserung der Genauigkeit der eingespritzten Kraftstoffmenge in einem Einspritzsystem mit den elektromagnetischen Einspritzventilen XL3 der Firma Continental Automotive GmbH.

Der Vortragsbeitrag von Miersch-Wiemers [Mie13] der Robert Bosch GmbH zeigt auf, welche Anforderungen sich aus der Gesetzgebung, dem Fahrkomfort und dem Kraftstoffverbrauch ableiten lassen. Ein Kraftstoffmengeneintrag mit hohem Druck sowie Mehrfacheinspritzungen pro Verbrennungszyklus bieten die Möglichkeit, diese Anforderungen zu erzielen. Um die daraus resultierenden Genauigkeiten an die Kleinste Menge an Kraftstoff zu erfüllen, wird als Lösung die Funktionalität CVO (CVO = Controlled Valve Adaption) eingesetzt.

In der Veröffentlichung von Olin der Delphi Corporation [Oli13] werden zur Reduzierung der Partikelemissionen Mehrfacheinspritzmuster eingesetzt, deren erwünschte Genauigkeit an die Kraftstoffmenge durch die Funktionalität ICLC (ICLC = Injector Closed Loop Control) erzielt wird.

Eine räumlich bessere Verteilung des Gemisches aus Luft und Kraftstoff und somit verbesserte Zerstäubungseigenschaften im Spraybild des Kraftstoffeinspritzventils werden durch diese Mehrfacheinspritzungen erzielt. Die abgesetzten Pulse erfüllen in zeitlicher Relation zur Zündung des Gemisches aus Benzin und Luft unterschiedliche Aufgaben.

Vor allem während dem Kaltstart des Verbrennungsmotors liegen typische Pulsmuster, sogenannte Einspritzpattern vor. Da die Zylinderinnenoberflächen wie Kolbenboden, Zylinderwand und Zylinderkopf thermisch in Verbindung zum Verbrennungsraum stehen, stellen diese Komponenten aufgrund der Umgebungstemperatur beim Kaltstart eine thermische Senke dar. Die Komponenten werden für das eingetragene Kraftstoffspray im Kontaktfall zu Kondensationsoberflächen. Das Kraftstoffkondensat erhöht die Partikelemissionen, da es unvollständig an der Verbrennung teilnimmt und die Rußbildung fördert. Um dies zu reduzieren, werden die Kraftstoffsprayspulse zeitlich verkürzt und somit deren Kontakt zur Komponentenoberfläche bis zur Zündung verhindert.

Ein weiteres besonderes Einspritzpattern im Kaltlaufbetrieb des Motors sind Einspritzpulse, die ein schnelles und frühes Einsetzen der katalytischen Wirkung des im Abgasstrang des Fahrzeugs verbauten Abgaskatalysators erzielen. Die Einspritzpulse werden zeitlich so eingetragen, dass sie sehr spät an der Verbrennungsreaktion teilnehmen, um

damit die Temperatur des verbrannten Abgases zu erhöhen. Dadurch verkürzt sich die Aufheizphase des im Abgasstrang verbauten Abgaskatalysators, der erst ab einer bestimmten Ausgangstemperatur seine konvertierenden Eigenschaften besitzt.

Die bekannten Lösungen für die geforderte Mengengenauigkeit beinhalten die Erfassung von elektrischen Ansteuergrößen des Einspritzventils, um daraus den zeitlichen Kraftstoffmengeneintrag ermitteln zu können. Der Markt für DI-Einspritzsysteme wird im Vortrag von Imoehl [Imo13] betrachtet und man rechnet im Zeitraum von 2010 bis 2030 mit einer Steigerung des Marktanteils von 25% auf 80%.

### **1.3 Ziel der Untersuchung**

Das Kraftstoffeinspritzventil ist physikalisch gesehen ein Energiekonverter, der im Verlauf eines Einspritzvorgangs verschiedene Energieformen speichert und konvertiert.

Die zur Aktivierung des Einspritzventils benötigte elektrische Energie wird aus der Fahrzeugbatterie entnommen und innerhalb des Einspritzventils zum Teil durch Verrichtung magnetischer Arbeit in magnetische Energie umgewandelt.

Die magnetische Energie wird wiederum teilweise zur Ausübung mechanischer Arbeit genutzt. Zum Aufrechterhalten dieser gespeicherten magnetischen Feldenergie muss dem elektromagnetischen Einspritzventil kontinuierlich weitere elektrische Energie zugeführt werden.

Letztendlich wird der größte Anteil der zugeführten elektrischen Energie durch Wirkmechanismen wie flussänderungsinduzierte Wirbelstromverluste und Kupferverluste in Joulesche Wärmeenergie umgesetzt.

Die Einspritzventile, welche sich in ihren mechanischen Konzepten unterscheiden können, besitzen die gemeinsame Eigenschaft, mittels mechanischer Arbeit einen hydraulischen Einspritzvorgang zu realisieren. Dieser dient dem direkten Einbringen der gewünschten Kraftstoffmenge in Form eines Kraftstoffsprays in den Brennraum.



Die elektrische Energie, die am Anfang der energetischen Wirkungskette eingebracht wird, steht im Fokus der Untersuchung, da sie als ursächlich treibende Kraft für die weiteren physikalischen Reaktionen verantwortlich ist. Der elektrische Energieeintrag variiert sowohl zeitabhängig als auch in seiner Größenordnung. Konzeptionell leistet hier das dem Einspritzventil vorgeschaltete Motorsteuergerät die Rahmenbedingungen für diese Variationen. Die elektrischen Führungsgrößen sind hier die Spulenspannung und der Spulenstrom.

Die in der Wirkungskette folgende magnetische Energie erzeugt in Zusammenhang mit dem jeweiligen mechanischen Konzept des elektromagnetischen Einspritzventils eine besondere Form der Magnetkraft, die Reluktanzkraft. Deren Formulierung und Ableitung leisten die Maxwell'schen Gleichungen aus den elektromagnetischen Größen. Die Reluktanzkraft ist die Ursache der mechanischen Wirkung in Form einer Bewegung, die eine geometrische Veränderung des elektromagnetischen Einspritzventils bewirkt.

Gleichzeitig erzeugt diese geometrische Änderung eine Veränderung der Magnetisierung des Einspritzventils, was eine zusätzliche induktive Rückkopplung in die elektrischen Führungsgrößen Spulenstrom und Spulenspannung zur Folge hat. Diese Rückkopplungen können in Zusammenhang mit den hydraulischen Einspritzvorgängen gebracht werden, wenn das mechanische Konzept des Einspritzventils und dessen Magnetkreis hinreichend bekannt ist.

Es ist somit ein grundlegender Bestandteil der Arbeit, zunächst die realisierten mechanischen und hydraulischen Konzepte der eingesetzten Einspritzventile zu analysieren und hiermit das dynamische Verhalten des Einspritzventils zu erklären.

Um die elektrischen Rahmenbedingungen ableiten zu können, ist die Untersuchung der im Motorsteuergerät verbauten Ansteuer Elektronik und deren Ansteuerkonzept notwendig. Die elektrische Energie wird über die Elektronik in der elektrisch aktiven Zustandsphase dem Einspritzventil „motorisch“ zugeführt oder in der elektrisch passiven Zustandsphase aus dem Einspritzventil „generatorisch“ abgeführt.

Mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen werden die unterschiedlichen Ursachen der elektromagnetischen Feldkräfte hergeleitet. Diese sind dann die Basis zur Reduzierung der

Feldkräfte auf den Fall des elektromagnetischen Einspritzventils, dessen magnetische Kraftwirkung primär durch die Reluktanzkraft hervorgerufen wird. Die Maxwellschen Gleichungen bilden außerdem den Zugang zur Berechnung der magnetischen Feldgrößen magnetische Feldstärke, magnetische Flussdichte und verketteter magnetischer Fluss.

Auf der Grundlage dieser Vorgaben werden die Untersuchungen formuliert, deren Ziel es ist, das Zusammenwirken von Mechanik, Hydraulik und Magnetismus unter Variation der durch die Elektronik eingetragenen elektrischen Energie zu analysieren und daraus Kenntnisse abzuleiten. Diese beziehen sich sowohl auf die aktuatorischen als auch sensorischen Eigenschaften des elektromagnetischen Einspritzventils und haben zum Ziel, deren Einfluss auf die Effizienz des Energieeintrags und auf die Genauigkeit der geforderten Kraftstoffmenge zu ermitteln.

In den Untersuchungen werden die elektrischen Führungsgrößen Spulenspannung und Spulenstrom messtechnisch ermittelt und mit diesen elektrischen Führungsgrößen der verkettete magnetische Fluss als magnetische Feldgröße errechnet.

## **2. Technik des Einspritzsystems**

### **2.1 Zeitliche Entwicklung**

Erste Versuche mit dynamischen Magnetmodellen zur Verbesserung der Performance von magnetischen Einspritzventilen erfolgen Anfang der 80'er Jahre. Bereits vorhandene und entwickelte Kraftstoffventile werden unter anderem in der Abhandlung von Smith [Smi80] analysiert und als Basis für deren Weiterentwicklung herangezogen. Das Modell beschreibt Flussänderungen mit Magnetisierungskurven, um daraus Änderungen in der Reluktanz für unterschiedliche Luftspaltgeometrien und Magnetmaterialien zu ermitteln. In der Reluktanzberechnung sind Einflüsse durch Streufelder enthalten. Aus der Reluktanz werden die Spuleninduktivität und daraus der Spulenstrom bestimmt. Dies dient als Basis zur Berechnung des magnetischen Flusses und damit auch der Magnetkraft. Alle betrachteten Systeme sind elektrisch mit zeitlich beaufschlagter Batteriespannung geregelt.

Die Simulation zur Unterstützung der Entwicklung im Bereich von Einspritzventilen wird unter anderem von Kuan in einer Veröffentlichung des IEEE [Kua90] genutzt. Hier wird systematisch das dynamische Verhalten des Einspritzventils ausgehend von den elektrischen Vorgaben der Leistungselektronik über den nicht linearen Magnetkreis bis zur mechanischen Reaktion nachgebildet.

Die Weiterentwicklung der Ventilapplikationen zur Direkteinspritzung wird in der Dissertation von Keilig [Kei04] behandelt. Unterschiedliche elektronische Ansteuerkonzepte zeigen unterschiedliche Verläufe sowohl in der Spulenspannung als auch im Spulenstrom. Einspritzventile von der Robert Bosch GmbH und anderen Wettbewerbern werden mit den unterschiedlichen Konzepten auf deren dynamisches Verhalten untersucht. Es wird unter anderem gezeigt, dass für hochdynamische Elektromagneten eine Ansteuerung mit Übererregung im untersuchten Einsatzbereich des Einspritzventils von Vorteil ist. Realisiert wird diese Ansteuerung zeitlich zu Beginn der Einspritzung durch eine Phase mit einer gegenüber der Batteriespannung erhöhten Versorgungsspannung, der Boostspannung und einem hohen Peakstrom. Diese Phase geht anschließend in zwei hintereinander folgende

Haltestromphasen über. Die Haltephasen werden mit Batteriespannung und unterschiedlichen Haltestrompegeln geregelt.

Die Veröffentlichungen von Kajima im IEEE [Kaj93] und [Kaj95] untersuchen das Reaktionsverhalten von elektromagnetischen Einspritzventilen im Hinblick auf hohe Dynamik und analysieren diese in Abhängigkeit der Höhe der erregenden Versorgungsspannung. Die Ergebnisse zeigen Vorteile im dynamischen Verhalten bei einer Erhöhung der erregenden Versorgungsspannungen. Darüber hinaus wird eine weiter verbesserte Dynamik erzielt, wenn das Einspritzventil vor der eigentlichen hydraulischen Einspritzung durch ein bestimmtes Stromprofil vormagnetisiert wird. Diese Möglichkeit, vor der eigentlichen Einspritzung eine Vormagnetisierung zu erzeugen, ist je nach realisiertem mechanischem Konzept des Einspritzventils umsetzbar. Die hochdynamischen Prozesse werden rechnergestützt untersucht und beschreiben einen verzögerten magnetischen Flussaufbau beim hydraulischen Öffnen des Einspritzventils und einen verzögerten magnetischen Flussabbau beim hydraulischen Schließen des Einspritzventils. Der Grund ist der Einfluss der im Magnetmaterial des Einspritzventils generierten Wirbelströme.

Die zu berücksichtigenden Wirbelstromaktivitäten sind bereits in früheren Jahren theoretisch betrachtet worden. Die Untersuchungen von Wirbelstromaktivitäten infolge von magnetischen Flussänderungen werden in den 50er und 60er Jahren unter anderem von Veröffentlichungen im IEEE von Pohl [Poh49], Kesavamurthy [Kes59a], [Kes59b] und [Kes61] sowie von Subba [Sub64] durchgeführt. Diese beschreiben auf analytischem Weg mittels unterschiedlicher mathematischer Ansätze einen Magnetflussaufbau, der sich dynamisch von der Oberfläche in das Kernmaterial fortsetzt. Die Verzögerungen im Flussaufbau werden durch Induktionen im Magnetmaterial hervorgerufen. Diese Induktionen führen je nach der Leitfähigkeit des Kernmaterials zu unterschiedlich stark ausgeprägten Wirbelströmen, die ihrer Ursache, nämlich der zeitlichen Änderung des Flusses, entgegenwirken. Haupteinflussparameter der dynamischen Flussverteilung sind die Leitfähigkeit, die Permeabilität sowie die Geometrie des Kernmaterials.

Die Veröffentlichung im IEEE von Aldefeld [Ald78] untersucht einen Magnetaktuator, welcher mit einem dreiecksförmigen Stromprofil erregt wird. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente wird hier zeitlich der Einfluss der Wirbelströme auf den verzögernden

magnetischen Flussaufbau analysiert und unter anderem auch die entstehenden Verluste über die Zeit berechnet.

Eine weitere Untersuchung im Hinblick auf Wirbelstromeinfluss erfolgt in der IEEE-Abhandlung von Lequesne [Leq89], bei der ein spezieller Magnetaktuator mit zwei Federn und mit Hilfe einer bestimmten Ansteuerelektronik erregt wird. Der sich einstellende zeitliche Stromverlauf wird grundlegend durch den Wirbelstrom verändert.

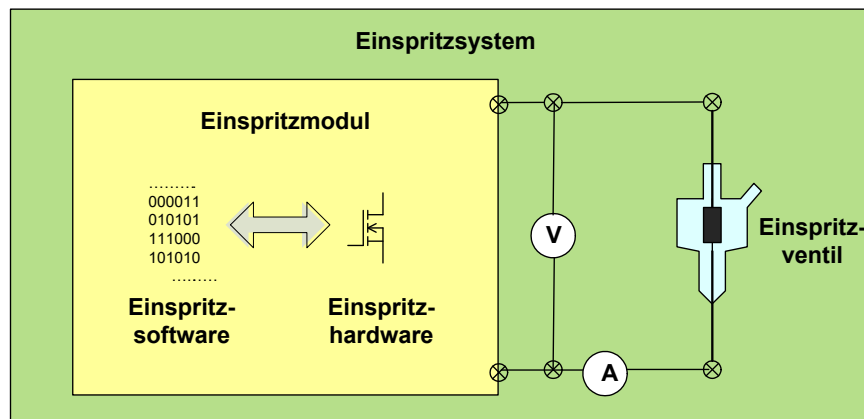
Die Dissertation von Piron [Pir99] zeigt zeitlich dynamisch, in zylindersymmetrischer Anordnung, das Erzeugen der Wirbelströme und damit verbunden das verzögerte Eindringen des magnetischen Hauptflusses in den Magnetaktuator.

Die Veröffentlichung von Dukart [Duk09] beschreibt die Ausführung eines Einspritzventils als Wirbelstromaktor, bei der sich der notwendige Spulenstrom in der Größenordnung von bis zu 10 000 A bewegt.

In einer weiteren Dissertation werden von Levin [Lev14] unter anderem unterschiedliche magnetische Pulververbundwerkstoffe charakterisiert, welche diese Wirbelstromaktivitäten unterdrücken sollen. Die untersuchten magnetischen Verluste teilen sich in die Bereiche Hystereseverluste, Wirbelstromverluste und Anomalieverluste auf. Die Anomalieverluste werden durch die sprunghaften Verschiebungen der magnetischen Domänen erklärt.

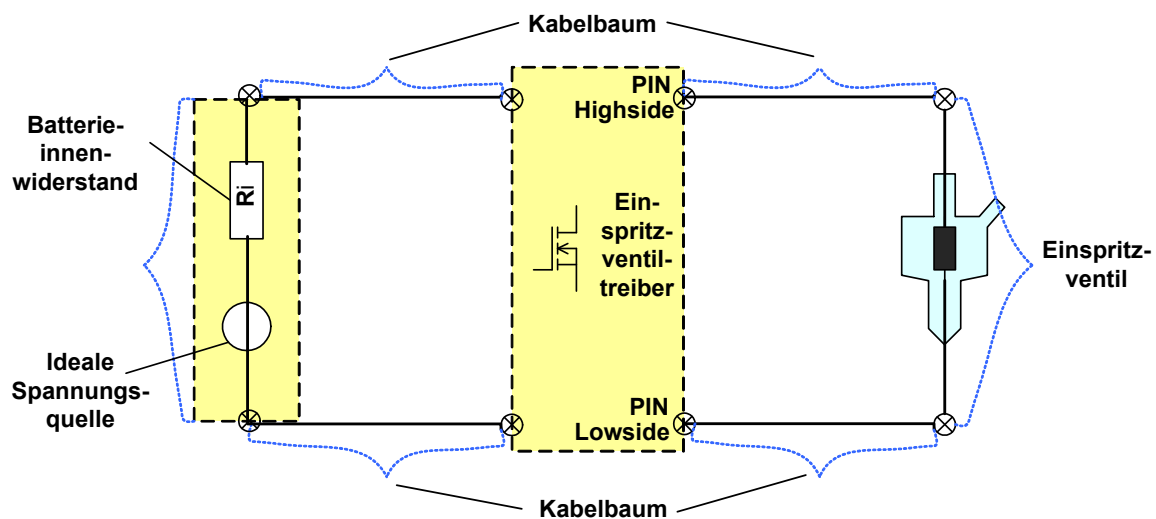
## 2.2 Komponentenverbund

Das Einspritzsystem im Kraftfahrzeug lässt sich gemäß Abb. 4 als Verbund verschiedener Einspritzkomponenten darstellen. Eine Komponente ist die Motorsteuerung, im Englischen Engine Control Unit (ECU), in der das elektronische Einspritzmodul integriert ist.



**Abbildung 4:** Schema der Einzelkomponenten des elektromagnetischen Teils des Einspritzsystems

Das elektronische Einspritzmodul in Abb. 5 ist elektrisch mit dem Einspritzventil verbunden, welches wiederum dem Kraftstoffsystem angeschlossen ist.



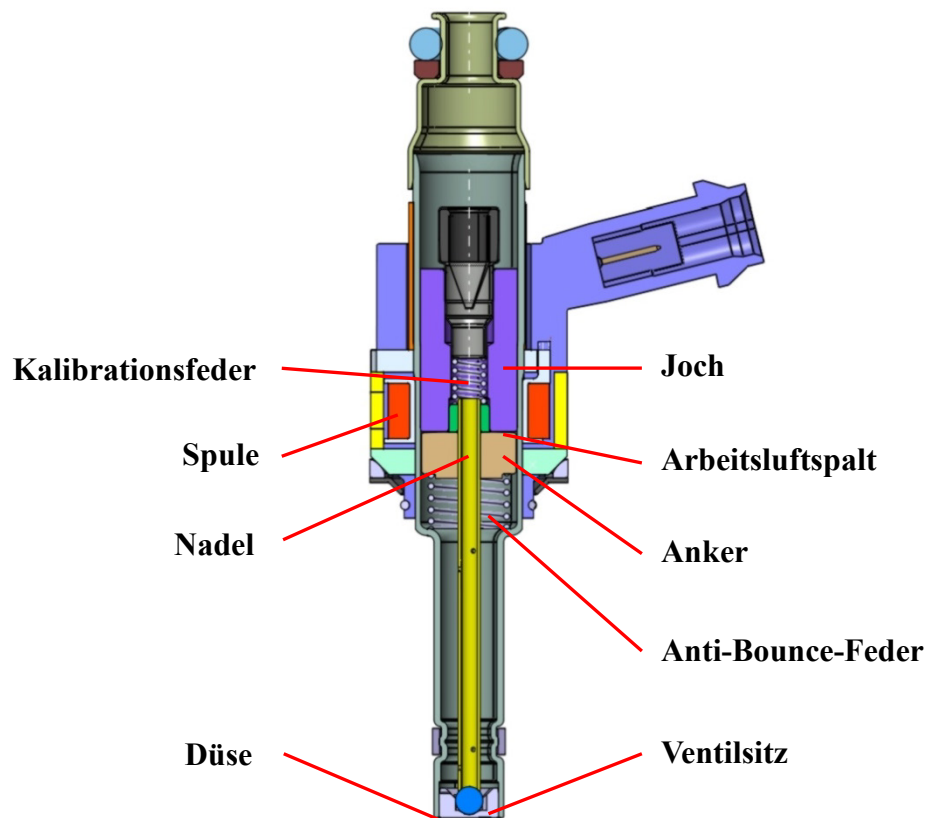
**Abbildung 5:** Elektrisches Gesamtbild der Einzelkomponenten im Fahrzeug

## 2.3 Arbeitsbereich des Einspritzventils

Der Begriff einer hydraulischen Einspritzzeit ist so zu verstehen, dass die eingesetzten Einspritzventile, die von der magnetischen Ausführung her den Topfankermagneten zuzuordnen sind, elektrisch derart angesteuert werden, dass sich der mechanisch mit der Nadel verbundene Anker in die Position „minimaler magnetischer Luftspalt“ bewegt. Hydraulisch führt dies zu einem statischen Kraftstofffluss durch das Einspritzventil. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 6 ein serienmäßiges Einspritzventil dargestellt.

Der Magnetanker ist, abhängig vom Konzept des Einspritzventils, mit der hydraulisch wirksamen Ventilnadel entweder starr oder über ein Feder-Massen-System verbunden. Der Anker führt die Nadel, mittels einer durch ein Stromprofil erzeugten Magnetkraft und gegen die Kalibrationsfeder und dem hydraulischen Druck arbeitend, in Richtung minimaler Luftspaltposition.

Diese Position liegt in einem stark hydraulisch entdrosselten Bereich und es stellt sich ohne Berücksichtigung von dynamischen Druckschwankungen ein konstanter statischer Kraftstoffdurchfluss ein. Dieser Zustand wird durch Beenden des Stromprofils, durch die Kalibrationsfeder unterstützt, verlassen und es kommt zum hydraulischen Schließvorgang.



**Abbildung 6:** Darstellung der Komponenten eines elektromagnetischen Einspritzventils

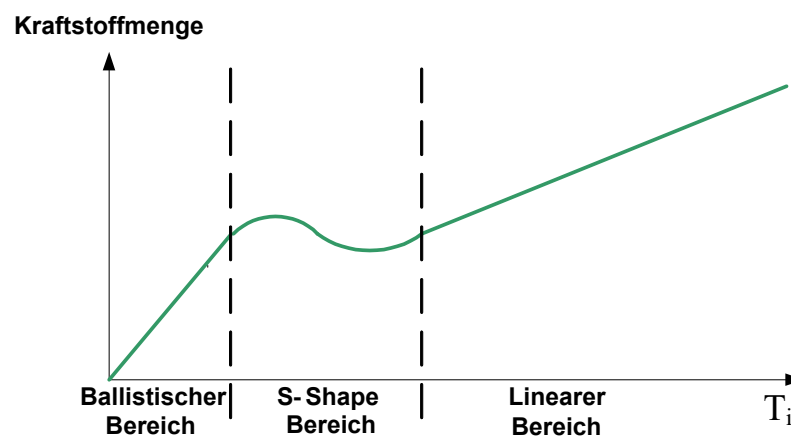
Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Stromprofilzeit  $T_i$  (im Englischen Injection Time) und der eingetragenen Kraftstoffmenge ist linear. Dieser lineare Bereich und zwei weitere Bereiche eines hydraulischen Betriebs sind in der Dissertation von Glasmachers [Gla08] erklärt.

Einen dieser weiteren Bereiche des hydraulischen Einspritzbetriebs stellt der sogenannte ballistische Bereich dar. In diesem Arbeitsbereich des Einspritzventils wird der konstante hydraulische Kraftstoffdurchfluss nicht erreicht. Das Einspritzventil wird zeitlich derart kurz mit Strom beaufschlagt, dass der Anker nicht seinen minimalen Luftspalt erreichen kann und die Nadel durch die Kopplung mit dem Anker in einen weniger hydraulisch entdrosselten Bereich geführt wird. Der Kraftstoffdurchfluss zeigt zeitlich einen parabelför-



migen Verlauf, dessen Scheitelwert kleiner oder punktuell gleich dem statischen Durchfluss ist. Der Zusammenhang zwischen  $T_i$  und der Kraftstoffmenge ist linear. Kleine Veränderungen von  $T_i$  bewirken hier eine starke Variation in der Kraftstoffmenge.

Der dritte Arbeitsbereich des Einspritzventils ist der Übergang zwischen dem ballistischen und dem statischen Kraftstoffmengeneintrag. Bedingt durch das mechanische Konzept ist ein S-förmiger Zusammenhang (im Englischen S-Shape) zwischen der elektrischen Einspritzzeit und der eingetragenen Kraftstoffmenge erkennbar. Der Verlauf zeigt zunächst einen starken Anstieg der Menge im ballistischen Bereich, erreicht dann ein lokales Maximum, um anschließend bei zunehmender Einspritzzeit  $T_i$  ein lokales Minimum einzunehmen. Es schließt sich, wie in der Abb. 7 dargestellt, ein flacher ansteigender linearer Mengenbereich an.



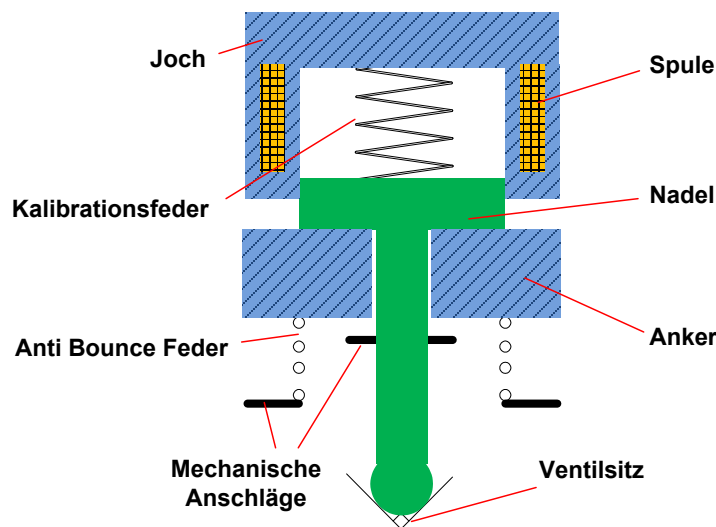
**Abbildung 7:** Abhängigkeit der elektrischen Einspritzzeit zur eingetragenen Kraftstoffmenge

## 2.4 Einspritzventil ohne Ankerfreiweg

### 2.4.1 Funktionelle Clusterung

Die Einzelkomponenten des Einspritzventils ohne Ankerfreiweg werden in der Abb. 8 in farbig skizzierte Funktionseinheiten eingeteilt.

Die elektromagnetische Funktionseinheit beinhaltet den Spulenkörper mit der Spule und der magnetflussführenden Komponente, aufgebaut aus einem beweglichen Anker und dem Joch. Mechanisch wirksam sind die Kalibrationsfeder und die Anti-Bounce-Feder, mit den mechanischen Anschlägen. Nadel und Ventilsitz bilden die hydraulisch wirksamen Komponenten.



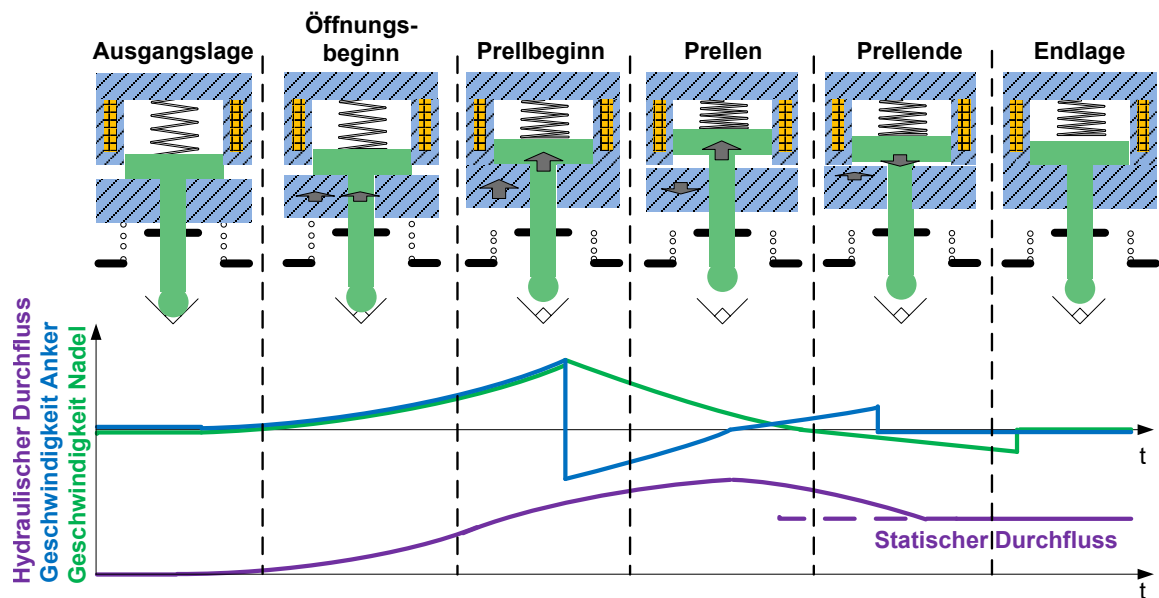
**Abbildung 8:** Die farbig dargestellten Funktionsgruppen des Einspritzventils ohne Ankerfreiweg, elektromagnetische in blau und gelb sowie mechanische in grün und schwarz

#### 2.4.2 Hydraulischer Öffnungsvorgang

Der hydraulische Öffnungsvorgang beginnt beim Einspritzventilkonzept ohne Ankerfreiweg, wenn die magnetische Kraft größer ist als die Summe aus hydraulischer Schließkraft und Kalibrationsfederkraft. Der Anker führt dann die Nadel in Richtung kleineren Arbeitsluftspalt. Dabei nimmt die hydraulische Kraft ab und die magnetische Kraft zu, was eine Beschleunigung des Systems aus Anker und Nadel bewirkt.

Beide treffen gemeinsam am Joch auf und der Anker führt eine zeitlich abklingende Prellbewegung aus. Die Nadel bewegt sich zunächst weiter, wird aber durch die Kalibrationsfeder stetig abgebremst und dann wieder entgegengesetzt beschleunigt, bis sie wiederum in Kontakt mit dem Anker kommt.

Der Vorzeichenwechsel der Nadelgeschwindigkeit ist in einem maximalen Kraftstoffdurchfluss erkennbar. Die Abb. 9 stellt den zeitlichen hydraulischen Öffnungsvorgang abschnittsweise dar.



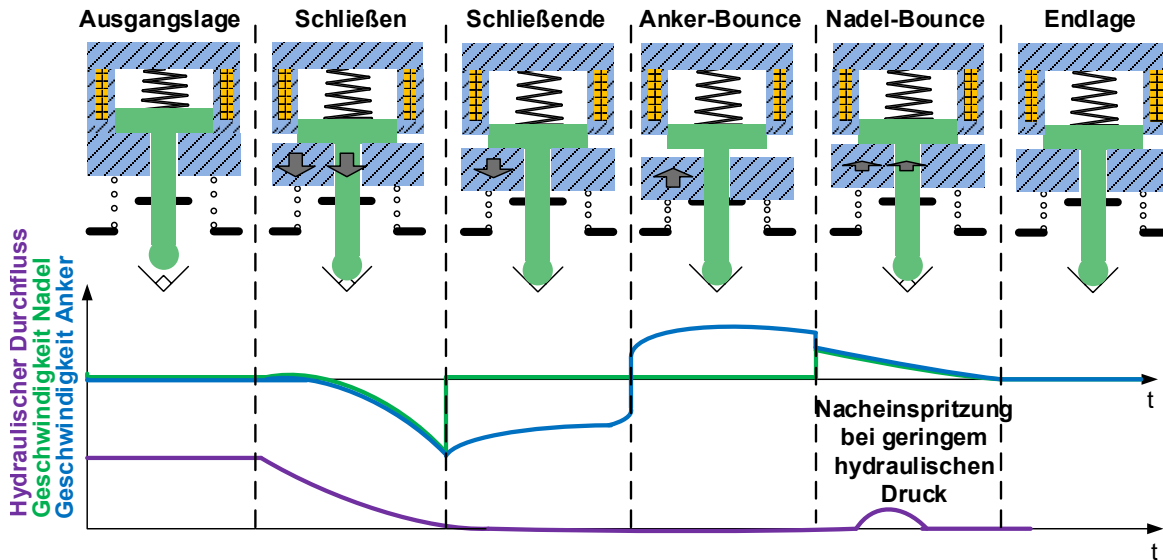
**Abbildung 9:** Hydraulischer Öffnungsvorgang beim Einspritzventil ohne Ankerfreiweg

### 2.4.3 Hydraulischer Schließvorgang

Der hydraulische Schließvorgang beginnt, wenn die magnetische Haltekraft des Ankers kleiner als die Summe aus Kalibrationsfederkraft und hydraulischer Kraft ist. Der starke Abfall des Spulenstroms sowie des magnetischen Flusses führt im leitfähigen Magnetmaterial des elektromagnetischen Einspritzventils zu Wirbelstromaktivitäten, die eine zusätzliche Verzögerung des Magnetflussabbaus erzeugen.

Der Anker und damit auch die Nadel lösen sich somit später vom Joch und erreichen gemeinsam den Sitzanschlag. Die Nadel wird durch die hohe Federkraft im Sitz gehalten, da sich die prellende Masse am Sitzanschlag um die Masse des Ankers verkleinert. Der Anker wird ab dem Sitzanschlag von der Anti-Bounce-Feder abgebremst, erreicht eine Geschwindigkeit von 0 m / s und wird schließlich wieder negativ beschleunigt. Es entsteht ein Vorzeichenwechsel in seiner Geschwindigkeit, der Anker wird durch die schwache Anti-Bounce-Federkraft wieder gering beschleunigt, erreicht die Nadel und es kann im Falle

eines geringen hydraulischen Gegendrucks zu einer unerwünschten Nacheinspritzung kommen. Die Abb. 10 skizziert zeitlich schrittweise den Schließvorgang.

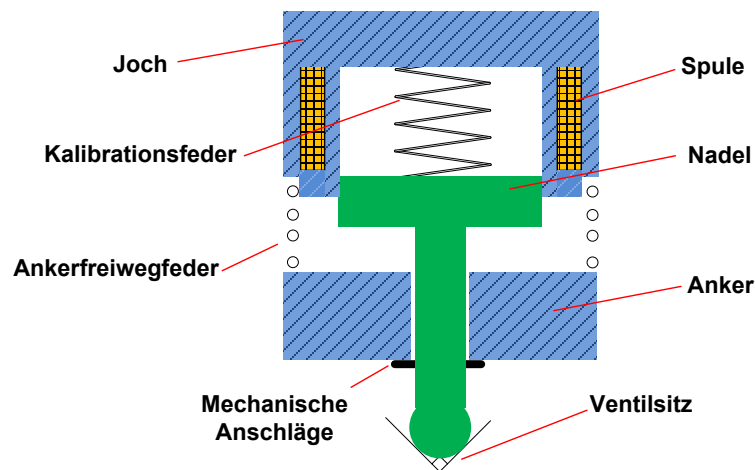


**Abbildung 10:** Hydraulischer Schließvorgang beim Einspritzventil ohne Ankerfreiweg

## 2.5 Einspritzventil mit Ankerfreiweg

### 2.5.1 Funktionelle Clusterung

Die Einzelkomponenten lassen sich in Abb.11 in farbige Funktionsgruppen zuordnen. Die Anti-Bounce-Feder wird beim Konzept mit Ankerfreiweg durch eine Ankerfreiwegfeder ersetzt.



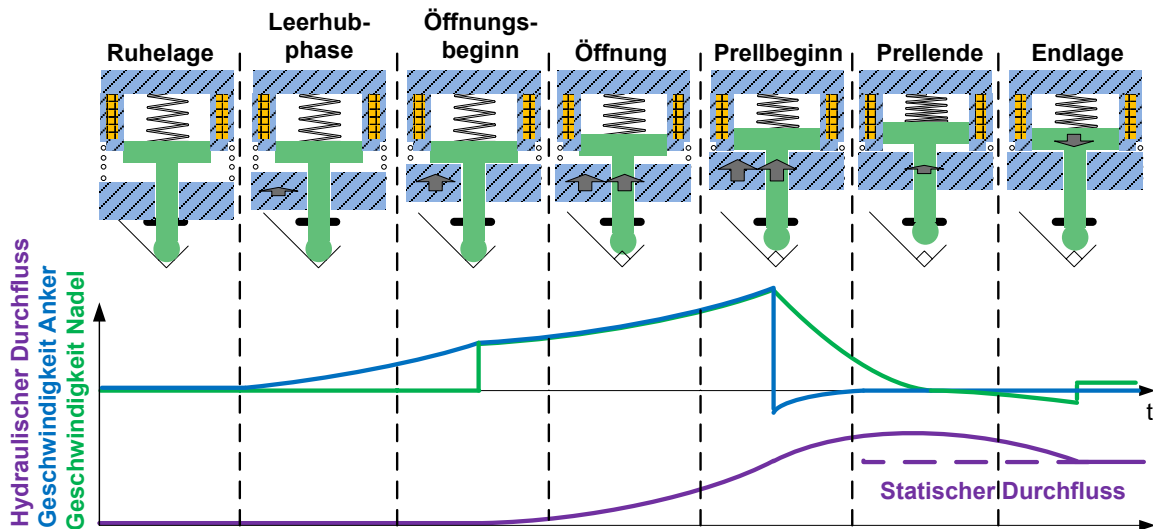
**Abbildung 11:** Die farbig dargestellten Funktionsgruppen des Einspritzventils mit Ankerfreiweg, elektromagnetische in blau und gelb sowie mechanische in grün und schwarz

### 2.5.2 Hydraulischer Öffnungsvorgang

Der hydraulische Öffnungsvorgang beginnt beim Einspritzventilkonzept mit Ankerfreiweg durch einen vorbeschleunigten Anker mit mechanischem Impuls.

Wenn die magnetische Kraft größer ist als die relativ geringe Kraft der Ankerfreiwegfeder, wird der Anker zunächst ohne hydraulischen Gegendruck in Richtung kleineren Luftspalt beschleunigt.

Er erreicht nach Überwindung des Ankerfreiwegs mit einem mechanischen Anfangsimpuls den Nadelanschlag. Anker und Nadel führen ab hier den gleichen hydraulischen Öffnungsvorgang wie beim Einspritzventil ohne Ankerfreiweg aus. Der hydraulische Öffnungsverlauf wird zeitlich in Abb. 12 dargestellt.

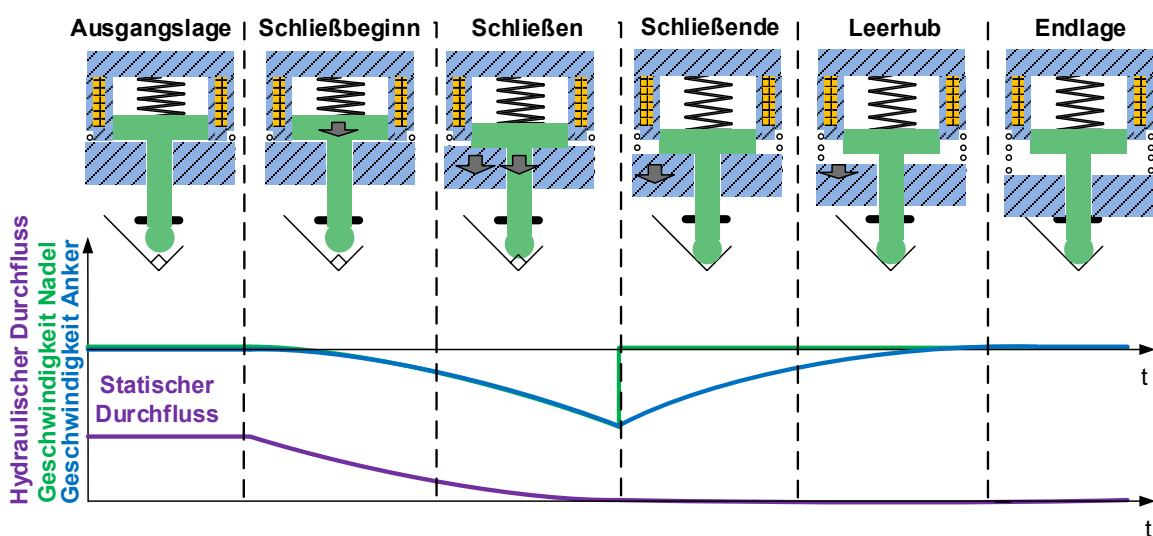


**Abbildung 12:** Hydraulischer Öffnungsvorgang beim Einspritzventil mit Ankerfreiweg

### 2.5.3 Hydraulischer Schließvorgang

Der hydraulische Schließvorgang entspricht zunächst dem Verlauf eines Einspritzventils ohne Ankerfreiweg. Wenn Anker und Nadel gemeinsam den hydraulischen Sitzanschlag erreicht haben, führt die Ankerfreiwegfeder den Anker weiter in seine Ruheposition.

Somit sind Nadel und Anker in ihrer Ruheposition wieder mechanisch entkoppelt. Die Abb. 13 stellt dies zeitlich dar.



**Abbildung 13:** Hydraulischer Schließvorgang beim Einspritzventil mit Ankerfreiweg

## **2.6 Elektronik**

### **2.6.1 Konzeptübersicht**

In der Arbeit von Glasmachers [Gla08] wird das zeitliche Stromprofil und Spannungsprofil der Ansteuerung eines Kraftstoffeinspritzventils untersucht. Es wird dargestellt, dass in einem Kraftfahrzeug typischerweise die Batteriespannung sowie eine aus der Batteriespannung generierte erhöhte Boostspannung zur Ansteuerung genutzt wird. Der Einfluss auf die Kraftstoffmenge durch Exemplarstreuung, Variation der Boostspannung, Variation der Batteriespannung sowie dem Kraftstoffdruck und der Temperatur werden analysiert.

Darüber hinaus wird die Möglichkeit betrachtet, in der Erfassung der elektrischen Größen Spulenstrom und Spulenspannung Rückschlüsse auf das hydraulische Verhalten des Einspritzventils zu ziehen. Die zum Einsatz kommende Elektronik lässt sich in den Teil Elektronik des Stromreglers und in den Teil Elektronik des DC-DC-Wandlers aufteilen. Der DC-DC-Wandler ist ein Bestandteil der elektrischen Versorgung des Stromreglers.

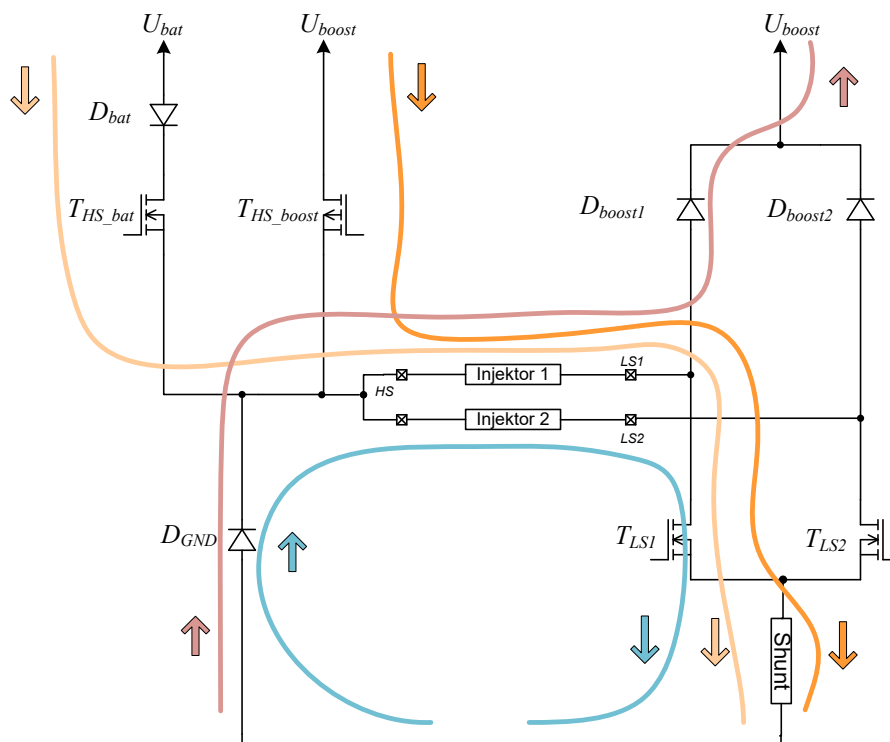
### **2.6.2 Prinzip des Stromreglers**

Der Regler ist als Highside- und Lowside-Treiber realisiert. Elektronische Highside-Schalter, sogenannte Highside-FET's (FET = Feld Effekt Transistor), stellen Energie aus der Batterie des Systems oder aus einem DC-DC-Wandler, dem Booster, bereit. Der Stromfluss durch das Einspritzventil wird mittels eines weiteren Lowside-FET's, dem elektronischen Lowside-Schalter gegen Masse, ermöglicht.

Je nach Auslegung der Verbrennungsstrategie des Verbrennungsmotors und somit auch der Einspritzstrategie ist es möglich, mehrere Einspritzventile gemeinsam aus einem Boost-FET oder Batterie-FET zu betreiben. Dies ist der Fall, wenn gewährleistet ist, dass bei den gemeinsam zu betreibenden Einspritzventilen immer nur ein Einspritzventil einen elektrischen Einspritzvorgang leisten muss. Die Auswahl des jeweiligen Einspritzventils wird durch den jeweiligen FET gegen Masse ermöglicht.

Stellt sich die Forderung einer zeitgleichen Bestromung mehrerer Einspritzventile, so spricht man hier vom sogenannten Überlappbetrieb. In diesem Fall ist die hydraulische Einspritzung in jeder zeitlichen Zuordnung der Einspritzventile zueinander möglich. Da aus Kostengründen nur ein DC-DC-Wandler pro Motorsteuergerät implementiert wird, können Überlappprozesse Einflüsse in der nominalen Boostspannung haben.

Ein elektronisches Schaltungsbeispiel in Abb. 14 beschreibt, wie zwei Einspritzventile mit gemeinsamen Batterie- und Boost-FET elektronisch zu betreiben sind. Die farbig zugeordneten Strompfade sind schaltungstechnisch in Abb. 14 skizziert und Spulenstrom und Spulenspannung in Abb. 15 zeitlich dargestellt. Der Potentialbezug für die Masse, dem Minuspol der Batterie, wird in der Regel mit GND (im Englischen Ground) bezeichnet. Die Bezeichnung für das Einspritzventil erfolgt im Schaltungsteil, aus dem Englischen abgeleitet, mit Injector.

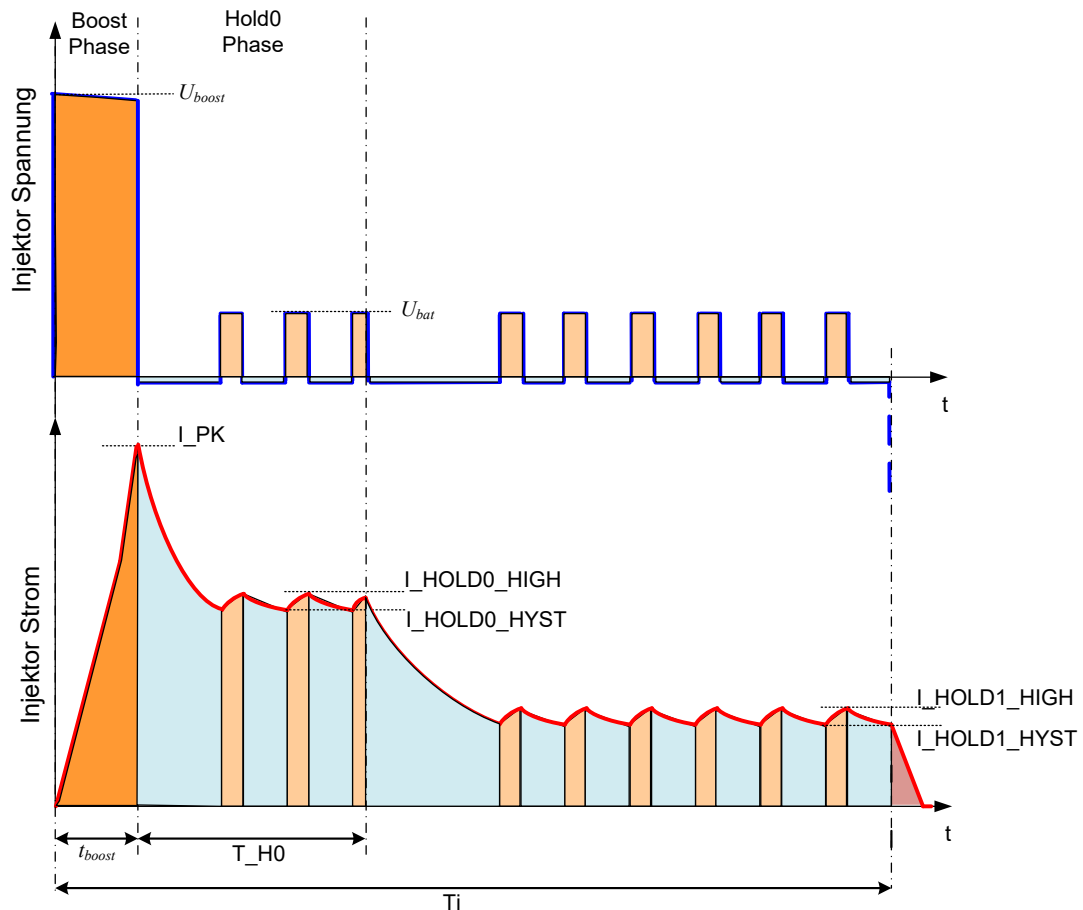


**Abbildung 14:** Die Variationsmöglichkeiten der Strompfade

Batterieschalter  $T_{HS\_bat}$  und Boostschalter  $T_{HS\_boost}$  führen dem über den Lowsideschalter  $T_{LS1}$  ausgewählten Einspritzventil 1 elektrische Energie zu. Die Verbindungsstecker am Steuergerät zum Einspritzventil entsprechen den Bezeichnungen  $HS$  und  $LS1$ .



Elektrische Energie wird vom Einspritzventil bei geöffnetem Batterie- und Boostschalter in den Booster zurückkommutiert, wenn der Lowsidesschalter offen ist, oder läuft bei geschlossenem Lowsideschalter über die Freilaufdiode  $D_{GND1}$  frei.



**Abbildung 15:** Schematisch zeitliche Darstellung von Spulenspannung und Spulenstrom

Das Konzept des Stromreglers erzeugt zeitlich je nach Einstellung der Stromsollwerte  $I_{PK}$ ,  $I_{HOLD0\_HIGH}$ ,  $I_{HOLD0\_HYST}$  und  $I_{HOLD1\_HIGH}$ ,  $I_{HOLD1\_HYST}$  ein Spannungspulsmuster zeitlich unterschiedlicher Phasen. Die elektrische Beaufschlagung seitens der Motorsteuerung erfolgt aus  $U_{boost}$  oder  $U_{bat}$ . Die elektrische Beaufschlagung seitens des Einspritzventils erfolgt in der Freilaufphase mit  $U_{freewheel}$  und in der Abkommütierungsphase mit  $U_{clamp}$  am Ende der zeitlichen Bestromung. Der Beginn der hydraulischen Einspritzphase erfolgt zeitlich im Bereich  $t_{boost}$  und  $T_{H0}$ .

### 2.6.3 DC-DC-Wandler

Der Wandler hat die Funktion, die zum Einspritzbeginn anliegende Boostspannung zu generieren. Er arbeitet als elektronischer Aufwärtswandler gemäß Tietze [Tie93], der prinzipiell mittels einer Speicherinduktivität und eines elektronischen Schalters die gewünschte Spulenspannung einem Zwischenkreiskondensator zur Verfügung stellt. Die Kriterien für die Wandlerauslegung sind hier die Nominalspannung und die mittlere Leistung. Während der Boostphase wird dem Einspritzventil eine bestimmte Boostenergie  $E_{boost}$  zugeführt. Diese Boostenergie wird dem Zwischenkreiskondensator entnommen und kann über die zeitliche Integration von  $t_{boost}$  der elektrischen Einspritzventilleistung, dem Produkt aus dem Peakstrom  $I_{boost}$  und der Boostspannung  $U_{boost}$  berechnet werden. Aus der Zylinderanzahl  $Z$  des Motors, seiner Maximaldrehzahl  $n$  [1/min] sowie der Anzahl der Einspritzpulse pro Verbrennungszyklus  $NR\_PLS$  errechnet sich in Gl. (2.1) eine mittlere Leistung von

$$P_{DC/DC} = \frac{E_{boost}}{T_{period}} \cdot NR\_PLS = \frac{E_{boost}}{120} \cdot n \cdot Z \cdot NR\_PLS \quad (2.1)$$

Die Auslegung des DC-DC-Wandlers ist ein maßgeblicher Kostenfaktor innerhalb einer Motorsteuerung. Unter anderem geht die mechanische und leistungsmäßige Auslegung der Speicherdrossel sowie der spezifizierte Arbeitsbereich über die Temperatur in die Kalkulation mit ein. In den Dokumentationen der Robert Bosch GmbH für das Hochdruckeinspritzventil HDEV5 [Rob13], im Kraftfahrtechnischen Taschenbuch [Rei11a] sowie im Nachschlagewerk für Autoelektronik [Rei11b] wird beschrieben, dass die allgemeine Auslegung der nominalen Boostspannung  $U_{boost}$  aktuell bei 65 V liegt.

Eine verfügbare kleinere Spannungsklasse und somit eine Reduktion der Versorgungsspannung des DC-DC-Wandlers würde der Spannungsbereich mit einer Boostspannung  $< 60$  V darstellen. Eine Übersicht verfügbarer MOSFET-Schalter zeigt die Firma Onsemi unter Angabe der maximalen Versorgungsspannung [Ons16]. Üblicherweise steigt die Anzahl von Applikationen mit MOSFET-Schalter einer kleineren Spannungsklasse. Somit wirkt sich dies direkt auf den von der Stückzahl abhängigen Komponentenpreis aus. Eine gleiche

Kostenbetrachtung kann hier bei dem jeweils im DC-DC-Wandler benötigten Speicherkondensator durchgeführt werden. Die gespeicherte elektrische Energie im Kondensator ergibt sich nach Gerthsen [Ger89] zu

$$E_{cap} = \frac{1}{2} \cdot C_{cap} \cdot U_{boost}^2 \quad (2.2)$$

Die jeweils notwendige Maximalspannung besitzt auch einen direkten Einfluss auf das Layout und die Konstruktion der elektronischen Motorsteuerung, da sich hier mit steigender Spannung die einzuhaltenden Isolationsabstände spannungsführender Teile vergrößern. Somit wird im Design mehr Platz beansprucht, was sich wiederum negativ auf die Kosten auswirkt.

#### 2.6.4 Spulenspannungsprofil und Spulenstromverlauf

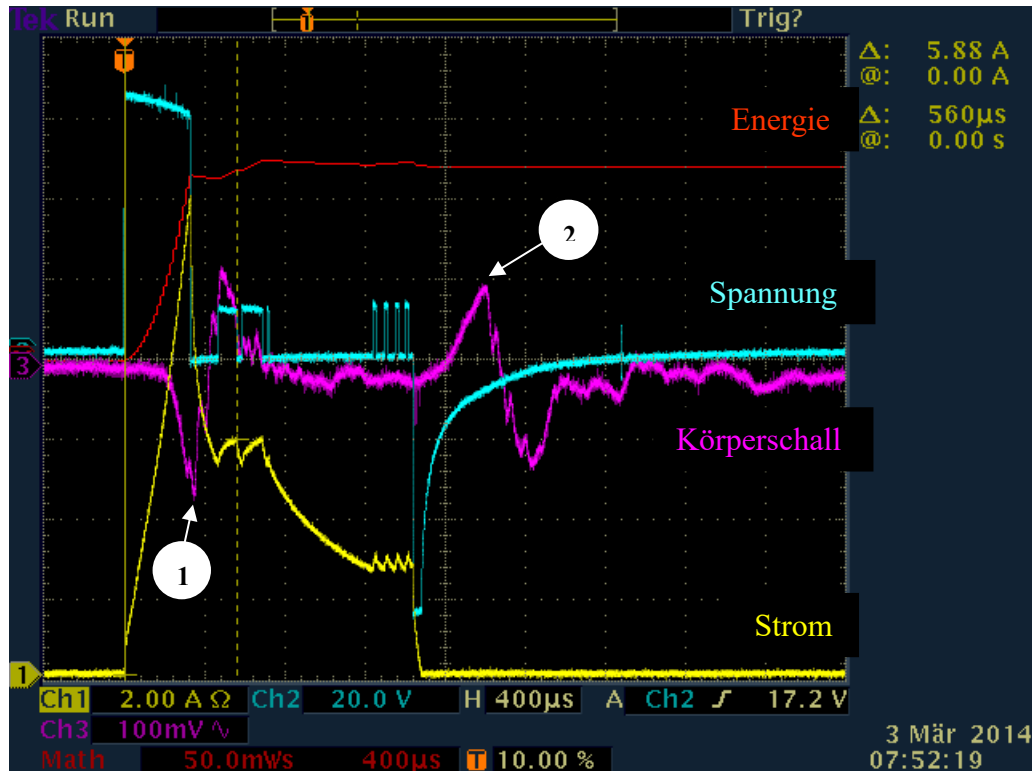
Die Messung an einem Einspritzventil ohne Ankerfreiweg veranschaulicht in Abb.13 eine Einspritzventilansteuerung mit Aufzeichnung von Spulenstrom, Spulenspannung und elektrischer Energie sowie das am Einspritzventil abgegriffene erzeugte Körperschallsignal, welches Rückschlüsse auf Anker- und Nadelbewegung liefern kann. Die elektrische Boostenergie wird gemäß Gl. (2.3) ermittelt.

$$E_{boost} = \int_0^{t_{boost}} U(t) \cdot I(t) dt \quad (2.3)$$

Die Integration beginnt mit dem Einschalten des Boosters, dem Anlegen der Boostspannung. Sie endet mit dem Abschalten der Boostspannung, in der Regel, wenn der eingestellte Peakstrom erreicht ist.

Zu Beginn des zeitlichen Verlaufs der Bestromung zeigt das Körperschallsignal in Abb. 16 im Bereich des maximalen Spulenstroms ein ausgeprägtes negatives Minimum (1), was den erstmaligen Jochaufschlag des stark beschleunigten Ankers und der Nadel darstellt. Zum Ende der zeitlichen Abfolge der Bestromung ist ein ausgeprägtes Maximum (2) im Körperschall zu erkennen. Dies ist der Punkt, an dem der Anker zusammen mit der Nadel

erstmalig seinen hydraulischen Sitz, vorab beschleunigt durch die Schließfeder, wieder erreicht.



**Abbildung 16:** Elektrische Einspritzventilsignale und abgegriffenes Körperschallsignal des Einspritzventils

## 2.7 Funktionen der Software

Die Produktionskosten für Software in Serienentwicklungen stellen sich im Vergleich zu materiell darstellbaren Bauteilkosten anders dar. Der Bereich „Einspritzsoftware“ ist physikalisch gesehen Programmcode im Flashspeicher. Dieser nutzt dynamisch in der Softwarelaufzeit Variablen des RAM-Speichers (im Englischen Random-Access Memory), Register, Pipelines sowie Interrupts und Stacks eines Mikroprozessors. Die in modernen Motorsteuergeräten implementierte Software arbeitet auf speziell für den Automotive-Sektor Powertrain entwickelten Mikrocontrollern.

Von der Infineon AG wird unter dem Marktnamen „Tricore“ eine Familie von Mikrocontrollern angeboten, die den Anforderungen im Automotive-Bereich genügen und durch

Schmitt [Sch99] detailliert in ihren Architekturen beschrieben werden. Die hochintegrierten Halbleiterbausteine bestehen aus einem oder mehreren Rechenkernen, die über Bussysteme mit unterschiedlicher Peripherie „on Chip“ in Verbindung stehen.

Die Peripheriemodule erfüllen den Zweck, nötige sensorische Eingangsinformationen, die für eine Verbrennungsmotorsteuerung nötig sind, aufzuarbeiten und die daraus ermittelten Reaktionen als Ausgangsinformationen bereitzustellen. Die Kommunikationsmodule dienen der Erfassung und Ausgabe vordigitalisierter und aufgearbeiteter Daten. Sensorische Aufarbeitungsmodule sind zum Beispiel Analog-Digital-Wandler zur Digitalisierung externer analoger Signale sowie digitale Input-Output-Ports zum Einlesen und Ausgeben von zeit- oder flankengesteuerten Digitalsignalen. Eine Übersicht für eine allgemeine Motorsteuerungsapplikation mit Benzin-Direkt-Einspritzung zeigt das Systemdiagramm der Infineon AG [Inf16a].

Das Einspritzmodul benötigt digitale Positionsinformationen der Kurbel- und Nockenwelle, um die exakte Orientierung der Motorkolben ermitteln zu können. Systemtemperaturen sowie Kraftstoffdruck sind weitere analoge Sensorgrößen, die zur korrekten Bemessung des Kraftstoffs im Zusammenhang mit der Mengenanforderung als Eingangsgrößen des Einspritzmoduls notwendig sind. Das Ergebnis ist ein zum Kurbelwellenwinkel bezogener Beginn einer hydraulischen Einspritzung, die nach einer definierten Zeit wieder beendet wird. Die geläufigen Bezeichnungen sind für den Beginn SOI (im Englischen Start Of Injection), für das Ende EOI (im Englischen End Of Injection) und für die Dauer die bereits bekannte elektrische Einspritzzeit  $T_i$ .

## 2.8 Elektrische Signalinformationen

Durch eine geeignete zusätzliche elektronische Hardwarebeschaltung stehen die elektrischen Größen Spulenstrom und Spulenspannung des Einspritzventils dem Mikrocontroller zur Verfügung und sind zur Weiterverarbeitung im Zeitbereich diskret abtastbar.

Die elektrische Signalerfassung dient als Basis zur Interpretation von Anker- und Nadelzustandsinformationen. Um die elektrischen Signale Strom und Spannung gleichzeitig erfassen zu können, müssen diese parallel analog eingelesen werden.

Die Offenlegungsschrift von Denk [Den13a] beschreibt ein Verfahren, wie Toleranzen in der elektronischen analogen Signalaufbereitung dieser Analogeingänge kompensiert werden können. Dazu wird sowohl dem Strommesseingang als auch dem Spannungsmesseingang ein Testsignal zugeführt, welche ein in der Zeit sprunghaftes Verhalten aufweist. Dieses Verhalten besitzt eine definierte und bekannte Flankensteilheit. Analysiert man zeitlich das analog-digital gewandelte Eingangssignal beider Kanäle, so kann man über die zeitlichen Verzögerungen auf die Toleranzen der Signalaufbereitung Rückschlüsse ziehen und zeitliche Korrekturfaktoren zum Abgleich beider Kanäle einführen.

Die Dissertation von Pawelczak [Paw05] beschreibt unterschiedliche elektrische und magnetische Aktuatoren. Deren Eigenschaften hinsichtlich einer Signalgenerierung als Messeffekt werden untersucht und systematisiert. Unter anderem wird die Empfindlichkeit elektromagnetischer Aktuatoren auf die Positionsbestimmung unter Analyse der luftspaltabhängigen Induktivität betrachtet.

In der Offenlegungsschrift von Locher [Loc90] wird ein Verfahren beschrieben, ein magnetisches Schaltorgan, welches einen beweglichen Anker besitzt, elektrisch unterschiedlich zu erregen. Diese Erregung erfolgt entweder mittels einer konstant geregelten Spulenspannung oder über einen konstant eingepprägten Strom. Die jeweils nicht konstant gehaltene GröÙe wird erfasst und daraus durch mathematische Auswertung die Bewegung ermittelt.

Thelen [The91] beschreibt in seiner Offenlegungsschrift die zeitlichen Bewegungsverläufe zwischen zwei Endpositionen eines elektromagnetischen Stellgliedes in der Auswertung des sich einstellenden Stroms.

Bei einem weiteren elektromagnetischen Stellglied wird eine Bewegung in der Veröffentlichung von Berberich [Ber92] durch Überlagerung von Spannungsimpulsen mit festen Ein- und Ausschaltzeiten ermittelt, deren resultierender zeitlicher Stromverlauf sich charakteristisch verändert.

Eine detaillierte elektronische Ansteuerungsschaltung für ein elektromagnetisches Einspritzventil zeigt Mumford [Mum94]. Hierbei wird zusätzlich ein Digitalisierungsverfahren angegeben, dass mit einer schaltungstechnischen Signalaufbereitung die Öffnungszeiten im Spulenstrom und die Schließzeiten in der Spulenspannung ermittelt.

Schmitz [Sch97a] berechnet an einem Aktuator in Zuständen ohne Bewegung den Ohmschen Widerstand, um daraus die Temperatur zu ermitteln, die dann für geeignete Kompensationsmaßnahmen von Temperaturabhängigkeiten des Systems genutzt wird.

In der Offenlegungsschrift von Schrey [Sch97b] wird ein Stromprofil definiert, das zum Fangen des Ankers benötigt wird. Die zeitliche Auswertung des Stroms in der Öffnungsphase dient zum Adaptieren des genutzten Profils.

Die Dissertation Glasmachers [Gla08] zeigt für elektromagnetische Einspritzventile die Detektionsmöglichkeiten für Ankerpositionen mittels mathematischer Ableitung der elektrischen Spulenspannung oder des elektrischen Spulenstroms auf.

In der Patentanmeldung von Winkes [Win00] wird die Frequenz eines geregelten Stroms untersucht, um daraus einen Rückschluss auf die Position des Ankers zu ziehen.

Die Veröffentlichung von Denk [Den14b] nutzt die Möglichkeit, durch das verwendete Stromprofil und dem vorliegenden elektronischen Hardwarekonzept, die Öffnungserkennung nicht im Freilaufstrom, sondern ebenfalls in der Freilaufspannung zu erfassen. Dies spart vorteilhafterweise einen weiteren Strommesskanal ein, da der Schließvorgang ebenfalls in der Spulenspannung erfasst wird.

In der Offenlegungsschrift von Denk [Den14d] wird zur Detektion des Nadelöffnungsvorgangs der Spulenstrom eines Einspritzventils während des Bewegungsvorgangs aufgezeichnet, und mit einem Referenzprofil verglichen. Das Referenzprofil ist das des Einspritzventils mit blockierter Mechanik in hydraulisch offener oder geschlossener Position. Die mathematische Differenzanalyse ergibt den Öffnungspunkt.

Das angemeldete Verfahren von Belyaev und Denk [Bel15] nutzt zur Erkennung des Bewegungszustandes eines Einspritzventils die Aufmodulation eines zusätzlichen Wechselspannungssignals, welches einem Standardspannungsprofil aufmoduliert wird. Die

Amplitudenanalyse des überlagerten resultierenden Stromsignals ergibt die gesuchte Bewegungsinformation.

Herkömmlich genutzte Analog-Digital-Wandler arbeiten nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation. Hier wird konzeptbedingt das Signal- zu Rauschverhältnis durch eine relativ niedrige Abtastrate und eine hohe Bitauflösung der Signalamplitude bestimmt. Ein in einem Mikrocontroller implementierter Analog-Digital-Wandler, der nach diesem Prinzip arbeitet, ist in der Spezifikation des Mikrocontrollers TC1796 der Infineon AG [Inf07] enthalten.

Die digitale Signalverarbeitung mit dem Delta-Sigma-Wandler ist ein im Bereich automobiler Anwendung aktuell neues integriertes Konzept der analogen Signalaufbereitung. Ein Delta-Sigma-Wandler kann in einfachster Weise als ein 1-Bit Modulator mit einer hohen modulierenden Frequenz dargestellt werden. Der damit erzeugte Bit-Stream kann durch unterschiedlich skalierbare und konfigurierbare Digitalfilter wieder demoduliert werden und erreicht theoretisch eine im Vergleich zum Analog-Digital-Wandler höhere Bitauflösung. Die Infineon AG liefert in der Beschreibung [Inf16b] den Aufbau eines Delta-Sigma-Wandlers und dessen Eigenschaften.

Der Elektronikteil der analogen Signalauswertung stellt eine Erweiterung des Einspritzmoduls dar. Diese Erweiterung unterstützt das Ziel, durch die Möglichkeit der Positionsdetektion bei einem Einspritzventil, die geforderten Genauigkeiten an die Einspritzmenge zu erfüllen.

## **2.9 Normen und Standards**

Um einen einheitlichen Standard in der Entwicklung einer Motorsteuerung und somit auch dem integrierten Einspritzsystem bei dessen Einsatz im Fahrzeug zu erhalten, werden von den Fahrzeugherstellern sogenannte Kundennormen vorgegeben. Sie beschreiben im Falle einer elektrischen Komponente den physikalisch elektrischen Arbeitsbereich, in denen die Komponenten definierte Funktionszustände erfüllen müssen. Die LV124 [Nor09] ist zum Beispiel eine Norm, die in einem Arbeitskreis aus Vertretern der Automobilhersteller AUDI AG, BMW AG, Daimler AG, Porsche AG und Volkswagen AG erarbeitet wurde.



Eine besonders signifikante Größe als Anforderung der Hersteller im Bereich der Einspritzung ist die Bordnetzspannung. Sie wird an der Anschlussstelle zum Bordnetz definiert. Der Funktionszustand „voller uneingeschränkter Funktionsbereich“ wird hier in einem Bereich von 9 V bis 15 V gefordert. Hintergrund ist hier die sich variabel einstellende Batteriespannung. Die Schwankungen können passiv aufgrund der chemischen Eigenschaften und des Lade- und Lastzustands der Batterie entstehen.

Aktiv wird zum Beispiel in Fahrzeugen des Volkswagen-Konzerns mit Batteriemanagementsystem zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei der sogenannten Rekuperation [Vol17] die Bordnetzspannung angehoben, während das Fahrzeug im Schubbetrieb arbeitet. Andererseits ist es auch möglich, wenn das Batteriemanagement eine vollständig geladene Batterie erkennt, die Bordnetzspannung in dem Maße so abzusenken, dass keine weitere Leistung von der Lichtmaschine angefordert wird und damit Kraftstoff eingespart werden kann. Eine ausführliche Beschreibung des Batteriemanagementsystems in einem Kraftfahrzeug liefert hier Reif [Rei11b] von der Robert Bosch GmbH.

Weitere Vorgaben der Fahrzeughersteller fordern, dass elektrische Fehler im System diagnostiziert werden und die Komponente Motorsteuerung sich selbst schützen und abschalten muss. Fehler sind elektrische Kurzschlüsse und Kabelbrüche im Kabelbaum des Fahrzeugs. Die detaillierte Betrachtung der Fehlerfälle erfolgt in der Norm LV124 [Nor09].

Mit den Anforderungen aus dem Kundenbereich und denen des jeweils zum Einsatz kommenden Einspritzventils muss der Stromregler in der Lage sein, individuell einstellbare Stromprofile darzustellen. Der Einsatz einer anwendungsspezifischen integrierten ASIC-Schaltung (im Englischen Application-Specific Integrated Circuit) stellt hier eine kostenoptimierte Lösung dar. Der Baustein kommuniziert und interagiert über eine digitale Schnittstelle mit der Einspritzsoftware.



### 3. Physikalische Formulierung

#### 3.1 Elektromagnetische Kräfte

Um die grundlegende Natur und Art der elektromagnetischen Kräfte in einem Kraftstoffeinspritzventil mit einer beweglichen Ankereinheit zu verstehen, wird der Ansatz gewählt, die allgemein möglichen Kraftterme mit Hilfe der Maxwellschen Gleichungen für bewegliche Körper herzuleiten. Die Terme werden dann im Abschnitt 3.2 hinsichtlich ihres Auftretens im Kraftstoffeinspritzventil untersucht.

In Cassing [Cas89] werden die Energien und Kraftdichten für ruhende und bewegte Körper formuliert. Die Ableitung erfolgt in Fischer [Fis76] und Simonyi [Sim89] allgemein unter der Annahme, dass elektrische und magnetische Polarisierungen zeitlich konstant sind. Die Maxwellschen Gleichungen lassen sich für ruhende Medien in differentieller und integraler Form darstellen.

Das Durchflutungsgesetz in differentieller Form, Gl. (3.1), beschreibt für ruhende Körper den Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke  $\mathbf{H}$  und der Stromdichte  $\mathbf{J}$  sowie der elektrischen Durchflutung  $\mathbf{D}$  und besitzt die folgende Form

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \quad (3.1)$$

Die integrale Form lässt sich in Gl. (3.2) nach Fischer [Fis76] darstellen

$$\oint \mathbf{H} \, ds = \int_a \mathbf{J} \, da + \frac{d}{dt} \int_a \mathbf{D} \, da \quad (3.2)$$

Das Induktionsgesetz zeigt den Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke  $\mathbf{E}$  und magnetischer Flussdichte  $\mathbf{B}$  und wird in Gl. (3.3) für ruhende Körper in differentieller Form zu

$$-\text{rot}\mathbf{E} = \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (3.3)$$

Die integrale Form in Gl. (3.4) nach Fischer [Fis76] lautet

$$-\oint \mathbf{E} \, d\mathbf{s} = \frac{d}{dt} \int_a \mathbf{B} \, d\mathbf{a} \quad (3.4)$$

Die Struktur der Maxwellschen Gleichungen für bewegte Medien erhält man, indem nach Fischer [Fis76] der Begriff der „substantiellen Änderung“ einer Größe eingeführt wird. Diese Größe existiert in einem an der Materie haftenden „substantiellen“ Punkt, der die Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  besitzt.

Die Größen in den Maxwellschen Gleichungen sind skalarer oder vektorieller Natur und im Allgemeinen abhängig von der Zeit, somit nicht stationär, vom Ort und der Geschwindigkeit. In einem substantiellen Punkt verändern sich diese Größen entsprechend ihren skalaren oder vektoriellen Eigenschaften. Mit nach Gl. (3.5) unendlich kleiner Verschiebung  $\delta\mathbf{l}$  des substantiellen Punktes um

$$\delta\mathbf{l} = \mathbf{v} \cdot dt \quad (3.5)$$

errechnet sich in Gl. (3.6) nach Fischer [Fis76] eine infinitesimale zeitliche Veränderung einer allgemeinen skalaren Größe  $x$  von

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \text{grad } x \quad (3.6)$$

und somit in Gl. (3.7) eine infinitesimale Veränderung von

$$dx = \partial x + \delta\mathbf{l} \cdot \text{grad } x \quad (3.7)$$

Die infinitesimale zeitliche Veränderung einer vektoriellen Größe  $\mathbf{A}$  ergibt Gl. (3.8) in der allgemeinen Herleitung von Fischer [Fis76]

$$\frac{d'A}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \text{rot}(\mathbf{H} \times \mathbf{v}) + \mathbf{v} \cdot \text{div } \mathbf{A} \quad (3.8)$$

und deren infinitesimale substantielle Änderung in Gl. (3.9)

$$d'A = \partial A + \text{rot}(\mathbf{H} \times \delta \mathbf{l}) + \delta \mathbf{l} \cdot \text{div } \mathbf{A} \quad (3.9)$$

Die Maxwellschen Differentialgleichungen für bewegte Medien werden mit Gl. (3.8) erweitert. Für das Durchflutungsgesetz ergeben sich in Gl. (3.10) somit zwei weitere zusätzliche geschwindigkeitsabhängige Terme

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \text{rot}(\mathbf{D} \times \mathbf{v}) + \mathbf{v} \text{ div } \mathbf{D} \quad (3.10)$$

Die magnetische Wirkung des dritten Terms in Gl. (3.10), eines bewegten und elektrisch polarisierten Dielektrikums, wurde 1888 durch Röntgen nachgewiesen, dies ist der in Heuck [Heu95] beschriebene Röntgenstrom. Die magnetische Wirkung durch die Bewegung materieller Ladungsträger, der vierte Term in Gl. (3.10), ist die sogenannte Konvektionsströmung, die von Rowland 1878 experimentell nachgewiesen wurde und in Berliner [Ber32] betrachtet wird.

Beim Induktionsgesetz ergeben sich in Gl. (3.11) zwei weitere geschwindigkeitsabhängige Terme

$$-\text{rot} \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \text{rot}(\mathbf{B} \times \mathbf{v}) + \mathbf{v} \text{ div } \mathbf{B} \quad (3.11)$$

Term zwei in Gl. (3.11) beschreibt nach Fischer [Fis76] die elektrische Wirkung eines in einem stationären magnetischen Feld bewegten dielektrischen unmagnetischen Körpers, der Term drei Gl. (3.11) ergibt sich zu 0.

Multipliziert man Gl. (3.10) mit der elektrischen Feldstärke  $\mathbf{E}$  und Gl. (3.11) mit der magnetischen Feldstärke  $\mathbf{H}$  und addiert anschließend beide Terme, so erhält man nach Fischer [Fis76] mit Gl. (3.12)

$$\mathbf{E} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{H} - \mathbf{H} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \quad (3.12)$$

den Zusammenhang in Gl. (3.13)

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \\ &+ \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ &+ \mathbf{H} \cdot \mathbf{v} \operatorname{div} \mathbf{B} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} \operatorname{div} \mathbf{D} \\ &+ \mathbf{H} \cdot \operatorname{rot}(\mathbf{B} \times \mathbf{v}) + \mathbf{E} \cdot \operatorname{rot}(\mathbf{D} \times \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Eigenschaften des Mediums, den skalaren Funktionen  $\mu$  und  $\varepsilon$  und der Annahme, dass das Medium zeitlich unabhängige magnetische oder elektrische Polarisierungen besitzt, werden die Permeabilität  $\mu$  und die Permittivität  $\varepsilon$  eindeutig in Bezug auf  $\mathbf{D}$  zu  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{B}$  zu  $\mathbf{H}$  zugeordnet, nämlich  $\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{E})$  und  $\mu = \mu(\mathbf{H})$ . Gl. (3.13) erhält unter Integration über ein die gesamten Felder einschließendes Volumen  $V$  und anschließender Anwendung des Satzes von Gauß nach Fischer [Fis76] die Form Gl. (3.14)

$$\oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \, ds = \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \, dV \quad (1)$$

$$+ \int_V \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \varepsilon \mathbf{E}}{\partial t} \, dV + \int_V \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} \, dV \quad (2) + (3)$$

(3.14)

$$+ \int_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{v} \operatorname{div} \mu \mathbf{H} \, dV + \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} \operatorname{div} \varepsilon \mathbf{E} \, dV \quad (4) + (5)$$

$$+ \int_V \mathbf{H} \cdot \operatorname{rot}(\mu \mathbf{H} \times \mathbf{v}) \, dV + \int_V \mathbf{E} \cdot \operatorname{rot}(\varepsilon \mathbf{E} \times \mathbf{v}) \, dV \quad (6) + (7)$$

Der Term in Gl. (3.14) links des Gleichheitszeichens ist die totale Leistung, die in das Volumen  $V$  und der einschließenden Hülle  $S$  einströmt.

Der Term (1) in Gl. (3.14) nach dem Gleichheitszeichen beschreibt die Joulesche Verlustleistung.

Die Terme (2) und (3) in Gl. (3.14) entsprechen der zeitlichen Änderung der Zunahme der elektrischen und magnetischen Energie.

Term (4) bis (7) in Gl. (3.14) stellen die zeitliche Änderung der Arbeit der gesamten Feldkräfte bei Existenz bewegter Teilchen oder Medien im Feld dar.

Simonyi [Sim89] leitet über die zeitliche Änderung der Arbeit der Feldkräfte und über den Ansatz der virtuellen Verschiebung deren Kraftdichte  $\mathbf{f}$  in Gl. (3.15) her. Zur Vorstellung der einzelnen Terme erfolgt bei konkreten Anwendungen ein kommerzielles Beispiel.

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times (\mu \cdot \mathbf{H}) \quad (1)$$

$$+ \mathbf{H} \cdot \operatorname{div}(\mu \cdot \mathbf{H}) + \mathbf{E} \cdot \operatorname{div}(\varepsilon \cdot \mathbf{E}) \quad (2) + (3)$$

$$- \int_0^H \mathbf{H} \operatorname{grad} \mu \, d\mathbf{H} - \int_0^E \mathbf{E} \operatorname{grad} \varepsilon \, d\mathbf{E} \quad (4) + (5) \quad (3.15)$$

$$+ \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \quad (6)$$

$$+ \varepsilon \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{v} \cdot \operatorname{div}(\mu \cdot \mathbf{H}) + \varepsilon \cdot \mathbf{E} \times \operatorname{rot}(\mu \cdot \mathbf{H} \times \mathbf{v}) \quad (7)+(8)$$

$$- \mu \cdot \mathbf{H} \times \mathbf{v} \cdot \operatorname{div}(\varepsilon \cdot \mathbf{E}) - \mu \cdot \mathbf{H} \times \operatorname{rot}(\varepsilon \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{v}) \quad (9)+(10)$$

Term (1) in Gl. (3.15) ist die auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld einwirkende Wirbelkraftdichte. Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die Kraftwirkung beim Betrieb einer elektrischen Asynchronmaschine, bei dem die im Läufer wirkenden induzierten Leitungsströme durch das in der Ständerwicklung erzeugte Magnetfeld eine Kraftwirkung erfahren.

Der Term (2) in Gl. (3.15) wirkt als Quellenkraftdichte im Magnetfeld auf einen Dauermagneten ein. Anwendungsbeispiel ist die Kraftwirkung bei einer elektrischen Synchronmaschine, deren läuferseitige Permanentmagnetisierung mit der Ständermagnetisierung wechselwirkt.

Term (3) in Gl. (3.15) ist die im elektrischen Feld auf vorhandene Polarisierungen einwirkende Quellenkraftdichte. Als Anwendung lassen sich hier allgemein Elektronen- und Ionenleiter angeben, die durch äußere Einwirkung eines elektrischen Feldes eine Verschiebung der polarisierten Materie oder Teilchen erzeugen.

Term (4) in Gl. (3.15) ist die im Magnetfeld im Bereich unterschiedlicher Permeabilitäten wirkende, von permeablen Gradienten ursächliche Kraftdichte, die Reluktanz. Anwendungsbeispiele sind hier der Reluktanzmotor und elektromagnetische Aktuatoren, deren



Wirkprinzip die Reduzierung eines Luftspalts ist, um den magnetischen Widerstand, die Reluktanz, zu minimieren.

Die Kraftdichte im Bereich permittiver Gradienten beschreibt Term (5) in Gl. (3.15).

Term (6) in Gl. (3.15) ist die Kraftdichte bei sich zeitlich verändernden elektromagnetischen Feldern. Nach Cassing [Cas89] wird diese wegen dem Pointing-Vektor  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  als Strahlungskraftdichte oder Strahlungsdruck bezeichnet. Diese tritt nur bei zeitlich veränderlichen Feldern auf.

Term (7) in Gl. (3.15) ist die Kraftdichte eines bewegten Dauermagneten im elektrischen Feld.

Term (8) in Gl. (3.15) ist die Kraftdichte von mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegten und nicht dielektrischen Materie durch ein elektrisches Feld.

Term (9) in Gl. (3.15) ist die Kraftdichte eines mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegten elektrischen Ladungsträgers, z.B. frei bewegliche Elektronen, im magnetischen Feld, die Lorentz-Kraftdichte.

Term (10) in Gl. (3.15) beschreibt die Kraftdichte von mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegter dielektrischer Materie durch ein magnetisches Feld.

Zu diesen Kraftdichten kommen zwei weitere Terme in Gl. (3.16) hinzu, wenn Permeabilität  $\mu$  und Permittivität  $\varepsilon$  von der Dichte  $\rho$  abhängig sind. Die Herleitung erfolgt in Cassing [Cas89] über die thermodynamischen Gleichungen.

$$\mathbf{f} = \int_0^H \text{grad} \left( \mathbf{H} \cdot \rho \cdot \frac{d\mu}{d\rho} \right) d\mathbf{H} + \int_0^E \text{grad} \left( \mathbf{E} \cdot \rho \cdot \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right) d\mathbf{E} \quad (3.16)$$

Der erste Term in Gl. (3.16) ist die im magnetischen Feld magnetostriktiv wirkende Gefällskraftdichte bei Körpern mit dichteabhängiger Permeabilität. Bei der kommerziellen Nutzung der Magnetostriktion, hier spricht man gemäß Staples [Sta12] auch vom Joule-

Effekt, findet das Material Terfelon-D der Firma Cedrat Technologies [Ced07] Anwendung als Aktuator, bei denen Hübe von bis zu 100  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

Der zweite Term in Gl. (3.16) ist die im elektrischen Feld elektrostriktiv wirkende Gefällskraftdichte bei Körpern mit dichteabhängiger Permittivität. Die Elektrostriktion findet unter anderem nach [Con15] im Automotive-Bereich bei den Einspritzventilen Anwendung, die als Piezoaktuatoren ausgelegt sind.

## 3.2 Magnetkräfte des Einspritzventils

Zur Ermittlung der für das Einspritzventil relevanten Kraftterme werden die vorliegenden elektromagnetischen Eigenschaften untersucht. Der sich relativ zu einem Magnetfeld bewegende materielle Körper ist der Anker.

Das Einspritzventil hat keine signifikanten elektrischen Polarisierungen und dielektrischen Eigenschaften. Darüber hinaus werden keine elektromagnetischen Wechselfelder zur Energieübertragung erzeugt. Somit entfallen die Terme (3), (5), (6) und (10).

Die Terme (7) und (8) wirken nur in Zusammenhang mit einer Relativbewegung zu einem elektrischen Feld. Ein vorhandenes elektrisches Feld im Einspritzventil ist die treibende Kraft des Spulenstroms nach Gl. (3.18). Das durch das Induktionsgesetz Gl. (3.3) aufgrund der magnetischen Flussänderungen erzeugte elektrische Feld wirkt gegeninduktiv in der Spule. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Einspritzventil aufgrund der Symmetrie und der hohen Leitfähigkeit des Magnetmaterials keine radialsymmetrische elektrische Feldausprägung durch räumlich elektrische Ladungsverschiebungen existiert.

Term (1) in Gl. (3.15) wirkt bei den elektromagnetischen Kraftstoffeinspritzventilen im Zusammenhang mit den Wirbelstromaktivitäten innerhalb des beweglichen Ankers. Die Ausprägung der Wirbelströme ist nach Piron [Pir99] von der Leitfähigkeit des Magnetmaterials des Ankers, der geometrischen Weglänge der Wirbelströme und der lokalen zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses abhängig. Da sich aufgrund der Zylindersymmetrie die Wirbelströme auf Kreisbahnen senkrecht zu den Flusslinien des Ankers bewegen, ist die daraus resultierende Kraft gleich 0 N. Eine Ankerbewegung in Richtung der

Hauptmagnetisierung erzeugt nach Term (1) in Gl. (3.15) keinen Kraftterm. Zusätzlich kommt es durch den Term (1) innerhalb der stromführenden Wicklung zu Abstoßungskräften zwischen den einzelnen Windungen, was zu einer mechanischen Belastung führt. Diese wirken sich nicht auf die hydraulische Funktion des Einspritzventils aus. Somit kann Term (1) entfallen.

Bei den elektromagnetischen Einspritzventilen ist die Wirkung von Term (2) in Gl. (3.15) durch Remanenzkraft in den ferromagnetischen Bestandteilen des Einspritzventils sichtbar. Sie kann beim hydraulischen Öffnen aufgrund der Remanenz zu „Klebewirkungen“ des Ankers am Ankerjoch führen. Rosenbaum untersucht in seiner Dissertation [Ros11] den Einfluss der Remanenz auf Aktuatoren.

Term (4) in Gl. (3.15) stellt den Hauptanteil der Kraftwirkung im Kraftstoffeinspritzventil dar. Für die weitere Analyse und Beschreibung der Reluktanzkraftdichte wird die Annahme getroffen, dass die Permeabilität des Magnetmaterials von der Feldstärke  $H$  unabhängig ist. Es wird nach Kallenbach [Kal14] näherungsweise im Fall des Einspritzventils vorausgesetzt, dass die Permeabilität ( $\mu \cdot \mu_0$ ) von Anker und Ankerjoch sehr viel größer ist als die Permeabilität des Luftspalts ( $\sim \mu_0$ ). Darüber hinaus ist die magnetische Flussdichte  $B$  homogen über die Anker- und Ankerjochoberfläche  $A$  verteilt und besitzt nur eine senkrechte Komponente  $B$  zu den Übergangsflächen.

Diese Vereinfachung führt zur Maxwellschen Zugkraftformel

$$\mathbf{F} = \frac{B^2 \cdot A}{2 \cdot \mu_0} \mathbf{n} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot A} \mathbf{n} \sim \frac{1}{\delta^2} \quad (3.17)$$

Die Zugkraftformel berechnet die Summe aus Reluktanz- und Remanenzkraft, die senkrecht zur Übergangsschicht in Richtung kleinerer Permeabilität wirkt. Sie führt beim Einspritzventil zu einer Reduzierung des Luftspalts  $\delta$ , die das Bewegen des Ankers zum Ankerjoch verursacht.

Term (9) in Gl. (3.15) beschreibt in allgemeinerer Form den Term (1) in Gl. (3.15), bei dem speziell die Leitungselektronen im metallischen Leiter die bewegten Ladungsträger darstellen. Sie bewegen sich in diesem Fall relativ zum materiellen Ladungsträger, dem elektrischen Leiter.

Die bekannten Ferromagneten sind nach Gl. (3.16) ebenfalls magnetostraktiv, jedoch ist, wie unter anderem in Staples [Sta12] beschrieben, der Effekt so klein, dass er nicht berücksichtigt wird.

Es ergeben sich zusammenfassend die Reluktanzkraft und die Remanenzkraft als auftretende Magnetkraftkomponenten im Einspritzventil.

### 3.3 Elektrische Beschreibung

Im metallischen Leiter ergibt sich nach Gerthsen [Ger89] eine mittlere Ladungsträgergeschwindigkeit aus dem Gleichgewichtsprozess zwischen der beschleunigenden Kraftwirkung des angelegten elektrischen Feldes und der dissipativen Wirkung der Stoßprozesse der Leitungselektronen mit dem Metallgitter.

Die Stärke der Wechselwirkung mit dem Metallgitter spiegelt sich in der zunächst allgemeinen anisotropen Leitfähigkeit  $\underline{\sigma}$  wieder. Gl. (3.18) ergibt für homogene, isotrope und metallische Leiter das Ohmsche Gesetz in der Form

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (3.18)$$

Um die elektrische Beschreibung des elektromagnetischen Kraftstoffeinspritzventils formulieren zu können, werden die Maxwellschen Gleichungen und das Ohmsche Gesetz gemäß folgendem physikalischen Wirkprinzip miteinander verkettet.

Die sich einstellende elektrische Spulenspannung, im Folgenden Zustandsspannung genannt, bildet ein elektrisches Feld, welches in der Spule des Einspritzventils nach Gl. (3.18) einen Leitungsstrom hervorruft.

Dieser Strom erzeugt nach Gl. (3.1) einen magnetischen Fluss im Einspritzventil, dessen Änderung wiederum nach Gl. (3.3) auf die Erregung durch die Eigeninduktion und gegebenenfalls die Bewegungsinduktion rückwirkt.

Die Gl. (3.19) beschreibt das System in der Gesamtheit seiner Wirkung bei aktivem Anlegen oder einer sich passiv einstellenden Zustandsspannung  $U_{inj}(t)$ .

$$U_{inj}(t) = R_{inj}(\vartheta) \cdot I_{inj}(t) + \frac{\partial \Psi(I, x, t)}{\partial I_{inj}(t)} \cdot \frac{dI_{inj}(t)}{dt} + \frac{\partial \Psi(I, x, t)}{\partial x(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \quad (3.19)$$

Je nach Zustandsspannung dient Gl. (3.18) der qualitativen Analyse gemäß Abb. 14 der sich einstellenden Ströme und internen Ohmschen Spannungsabfälle.

Für feste Geometrie eines Einspritzventils, der Annahme einer linearen Flussänderung über den Strom sowie einer konstanten Temperatur ergibt sich aus Gl. (3.19) der Zusammenhang

$$U_{inj}(t) = R_{inj} \cdot I_{inj}(t) + L_{inj} \cdot \frac{dI_{inj}(t)}{dt} \quad (3.20)$$

Mit der konstanten differentiellen Induktivität

$$L_{inj} = \frac{\partial \Psi(I, x=const., t)}{\partial I_{inj}(t)} \quad (3.21)$$

Die Lösung für den Stromverlauf nach dem Zuschalten einer Spannung  $U_{inj}$  an einer Reihenschaltung aus einem Widerstand  $R_{inj}$  und einer Induktivität  $L_{inj}$  lautet nach Gerthsen [Ger89]

$$I_{inj} = \frac{U_{inj}}{R_{inj}} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.22)$$

mit der Zeitkonstanten  $\tau$

$$\tau = \frac{L_{inj}}{R_{inj}} \quad (3.23)$$

Die Lösung für den Stromverlauf nach dem Abschalten eines Stroms  $I_0$  an einer Parallelschaltung aus einem Widerstand  $R_{inj}$  und einer Induktivität  $L_{inj}$  lautet nach Gerthsen [Ger89]

$$I_{inj} = I_0 \cdot (e^{-t/\tau}) \quad (3.24)$$

mit der Zeitkonstanten  $\tau$  aus Gl. (3.22)

Die gespeicherte magnetische Feldenergie ergibt sich nach Gerthsen [Ger89] in Gl. (3.25) zu

$$E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L_{inj} \cdot I_{inj}^2 \quad (3.25)$$

Die Zustandsspannung wird je nach Art der Aktivierung der Ansteuerungselektronik in Abb. 14 in Bezug auf ihr Vorzeichen positiven und negativen Bereichen zugeordnet. Die Veröffentlichung der Systembeschreibung einer elektromagnetischen Einspritzung in einem Ottomotor von Denk [Den17] geht wie im Abschnitt 3.3.1 und Abschnitt 3.3.2 auf diese beiden Zuordnungen ein.

### 3.3.1 Fremderregung

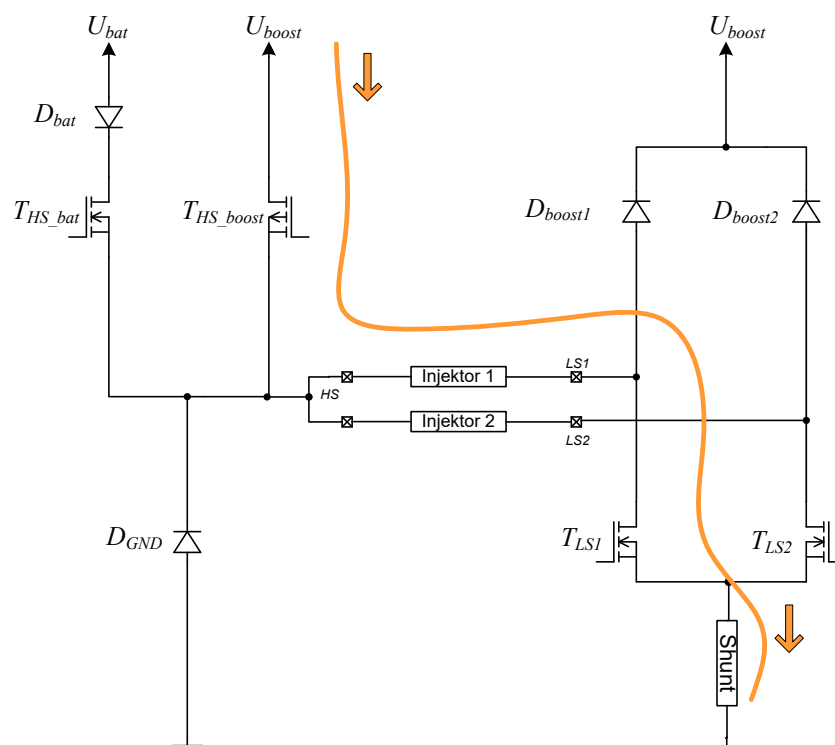
Im Falle einer positiven Zuordnung wird an dem Einspritzventil eine Quellenspannung  $U_{boost}$  oder  $U_{bat}$  angelegt. Energetisch betrachtet wird hier dem Einspritzventil von außen elektrische Energie zugeführt, die zum Teil in magnetische Feldenergie umgewandelt wird. Es fließt entweder ein Batteriestrom oder ein Peakstrom.

Im Boostbetrieb wird in Abb. 17 die im Zwischenkreiskondensator gespeicherte elektrische Energie zum Teil dem Einspritzventil zugeführt. An den Klemmen des Einspritzventils liegt der signifikante Anteil der Kondensatorspannung abzüglich interner Spannungsabfälle in der Motorsteuerung an. Während des Boostbetriebs sinkt die Systemspannung

charakteristisch ab. Ursache ist zum einen der ansteigende Peakstrom, zum anderen der Spannungsverlust am Kondensator durch die abgegebene Ladung. Das Ende der Boostphase erfolgt entweder über das Erreichen eines definierten Stromwertes oder über eine zeitliche Vorgabe. Gl. (3.19) geht in Gl. (3.26) über mit

$$U_{boost} = R \cdot I + \frac{\partial \Psi}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.26)$$

Der betrachtete Strombereich wird auf 3 A bis 15 A eingeschränkt, da im Bereich von 3 A die typischen Halteströme der Einspritzventile liegen. Der Wert 15 A legt den maximalen Peakstrom fest. Die Ohmschen Werte der Einspritzventile liegen im Bereich von 1,2  $\Omega$  bis 2  $\Omega$ . Somit liegen zum Zeitpunkt der relevanten inhärenten Gegeninduktionstermen die Ohmschen Spannungsabfälle bei 3,9 V bis 30 V.



**Abbildung 17:** Peakstrompfad im Schaltbild

Im Falle des Betriebs mit Bordnetzspannung, der Batteriephase, wird in Abb. 18 die an der Motorsteuerung anliegende Batteriespannung, unter Berücksichtigung interner Ohmscher Spannungsabfälle, den Klemmen des Einspritzventils zugeführt. Um die Batteriespannung

von der Boostspannung zu entkoppeln, wird eine Diode implementiert, die einen zusätzlichen Spannungsabfall erzeugt.

Das Kriterium des sich durch die Gegeninduktion einstellenden Stromverlaufs wird somit auch durch den temperaturabhängigen Gesamtsystemwiderstand und kapazitiven und halbleitertechnischen Spannungsverlusten mitbestimmt. Im Grunde strebt das System nach der Verrichtung der Magnetisierungsarbeit einem Ohmschen Grenzwert entgegen. In der Boostphase wird dieser Wert bei den Betriebsströmen nicht erreicht, aber der Einfluss ist in der Steigung des Stroms erkennbar. Im Batteriefall gibt es durchaus Fälle, in denen der Spulenstrom des Einspritzventils diesen Grenzfall erreicht. Es ergibt sich Gl. (3.27) zu

$$U_{bat} = R \cdot I + \frac{\partial \Psi}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.27)$$

Der betrachtete Strombereich wird auf den unteren Grenzwert von 0 A gesetzt, der obere Wert variiert je nach Sättigungsfall zwischen 4,5 A und 14,5 A, da im Bereich von 9 V bis 15 V die Batteriespannungslevel und die Ohmschen Werte der Einspritzventile wieder bei 1,2  $\Omega$  bis 2  $\Omega$  liegen. Zum Zeitpunkt der relevanten inhärenten Gegeninduktionsterme können die Ohmschen Spannungsabfälle somit im Bereich der Betriebsspannung liegen.



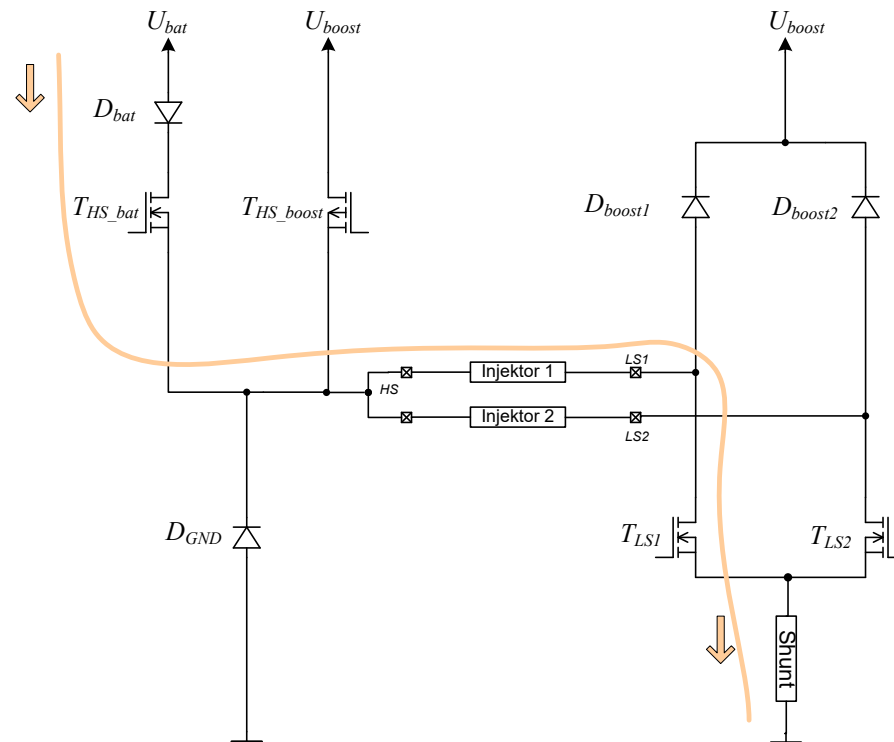


Abbildung 18: Batteriestrompfad im Schaltbild

### 3.3.2 Eigenerregung

Im Falle der negativen Zuordnung wird die durch die Eigeninduktion des Einspritzventils auftretende Spulenspannung durch eine geeignete Aktivierung der Elektronikstruktur auf  $U_{freewheel}$  oder  $U_{clamp}$  begrenzt. Hier wird dem Gesamtsystem keine weitere elektrische Energie zugeführt, sondern magnetische Feldenergie aus dem Einspritzventil elektrisch abgeführt.

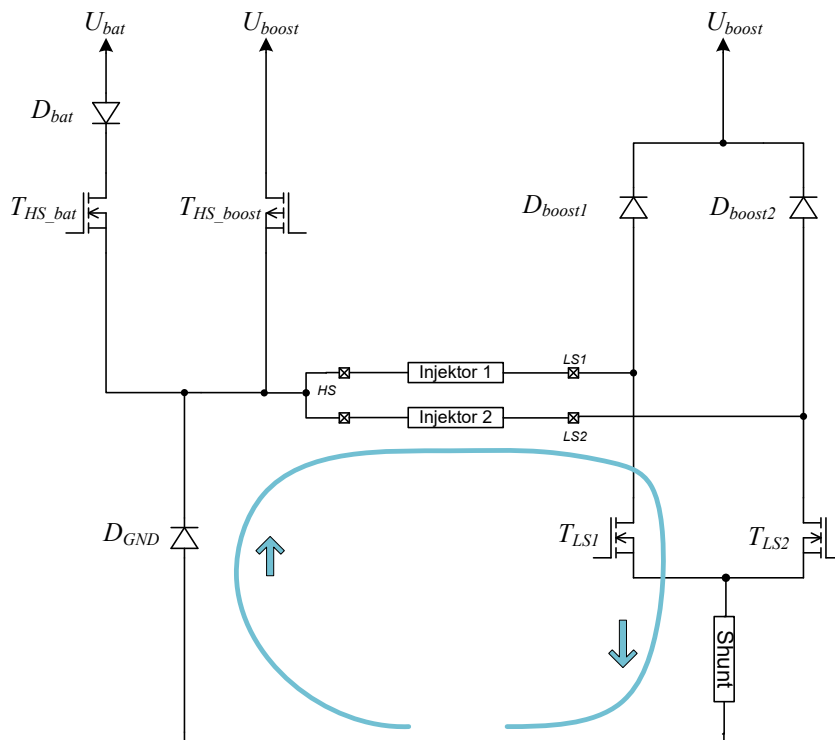
Die Freilaufphase gegen Masse ist gekennzeichnet durch einen negativen Stromgradienten. Die sich einstellende Systemspannung setzt sich aus einem Spannungsabfall an der Freilaufdiode  $D_{GND}$  und einem Restanteil durch die gesamten Ohmschen Anteile des Systems im Strompfad zusammen. In einer ersten Näherung kann in Gl. (3.28) die sich einstellende kleine negative Zustandsspannung zu 0 V gesetzt werden.

$$-R \cdot I = \frac{\partial \Psi}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.28)$$

Es ergibt sich ein Gleichgewicht der Spannungsabfälle zwischen dem Ohmschen Anteil und der Summe der induktiven Anteile. Energetisch ist der Zustand gekennzeichnet durch eine Umwandlung gespeicherter magnetischer Feldenergie in elektrischen Freilaufstrom. Der Freilaufstrom in Abb. 19 und der damit verbundene magnetische Feldabbau hat durch die sich einstellende geringe Spulenspannung des Einspritzventils eine lange Abklingzeit.

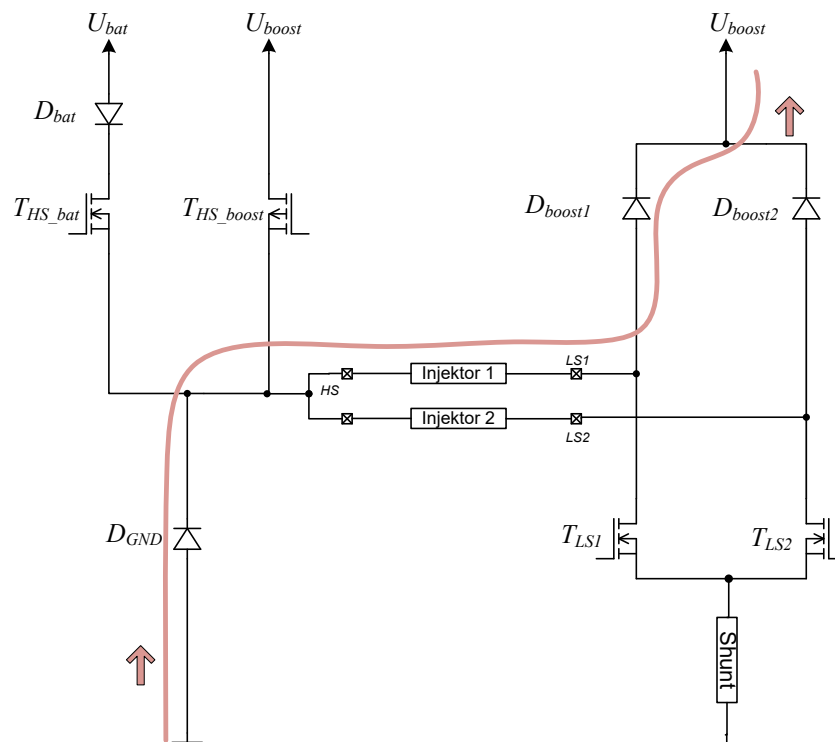
Die beiden induktiven Terme in Gl. (3.28) müssen wegen dem reellen Widerstand und dem Betrieb im Bereich positiver Ströme und positiver oder negativer Spulenspannungen folgende Randbedingung in Gl. (3.29) erfüllen

$$\frac{\partial \Psi}{\partial I} > 0 \text{ und } \frac{dI}{dt} < 0 \quad \text{sowie} \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} < 0 \text{ und } \frac{dx}{dt} > 0 \quad (3.29)$$



**Abbildung 19:** Freilaufstrompfad im Schaltbild

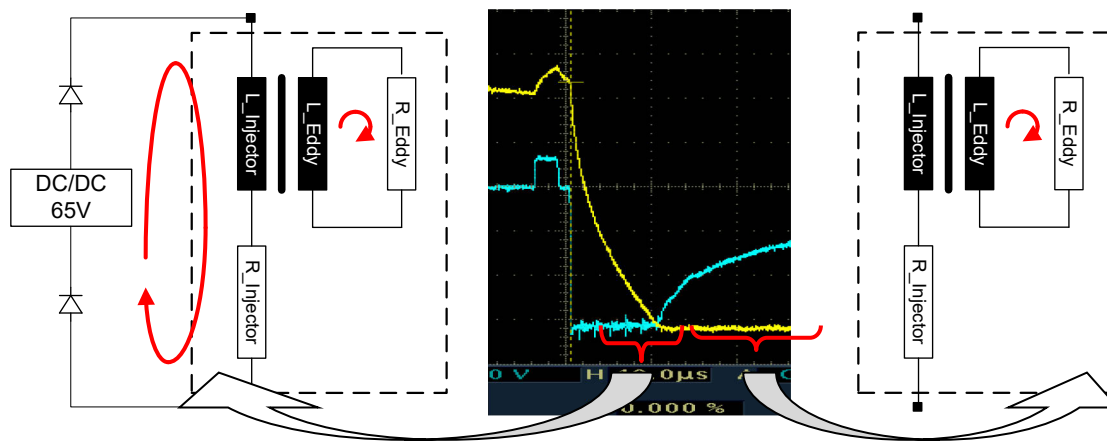
Die Abkommutierphase oder auch Schnelllöschung ist durch das Abschalten aller elektronischen Schalter gekennzeichnet. Hiermit wird der hydraulische Schließvorgang des Einspritzventils eingeleitet. Die Unterbrechung des Stromflusses und der damit verbundene Magnetfeldabbau führen zu einer hohen Gegeninduktionsspannung. Überschreitet diese Spannung die Summe aus  $U_{boost}$  und der Durchbruchspannung von  $D_{boost1}$  und  $D_{GND}$ , so wird diese begrenzt und der Spulenstrom des Einspritzventils wird wie in Abb. 20 in den Zwischenkreiskondensator umgeladen. Der Feldabbau führt zu starken Wirbelstromanregungen, wenn das verwendete Magnetmaterial des Einspritzventils eine elektrische Leitfähigkeit besitzt.



**Abbildung 20:** Abkommutierstrompfad im Schaltbild

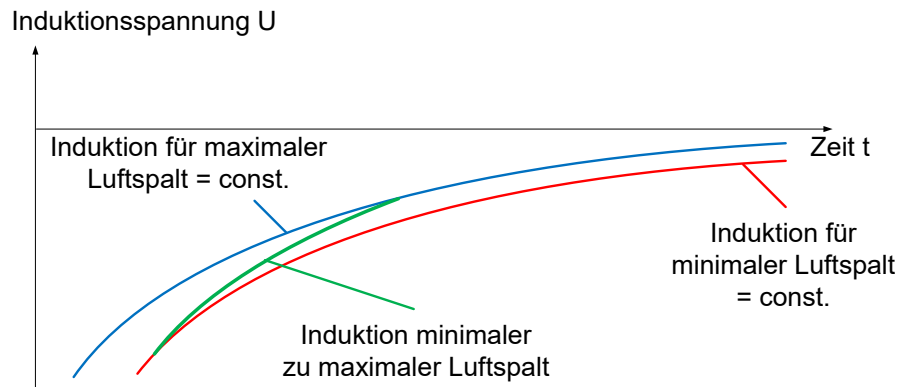
Die aktive Abkommutierphase wird in Abb. 21 nach Unterschreiten der Induktion um die Summenspannung durch die passive Abkommutierphase abgelöst. Der Abbau der gespeicherten magnetischen Energie und damit das Maß der zeitlichen Veränderung des magnetischen Flusses, kann in diesem Moment nicht weiter über die Umladung erfolgen, da die vom Einspritzventil nach Gl. (3.3) notwendige Spannungshöhe nicht mehr induziert wer-

den kann. Der messbare Spulenstrom klingt auf nahezu 0 A ab, die induzierte Spulenspannung erreicht nicht mehr das Clampniveau und beschreibt ein nach Gl. (3.23) exponentiell auf den Wert 0 V abfallendes Verhalten. Dieses Verhalten ist ein Induktionseffekt als Summe der zeitlichen Veränderung des magnetischen Flusses innerhalb der Einspritzventilspule. Der verzögernde Effekt des Flussabbaus ist, ähnlich wie beim hydraulischen Öffnungsvorgang, auf die Leitfähigkeit des Magnetmaterials zurückzuführen, welche Wirbelstromaktivitäten hervorruft, die zeitlich dissipativ abklingen.



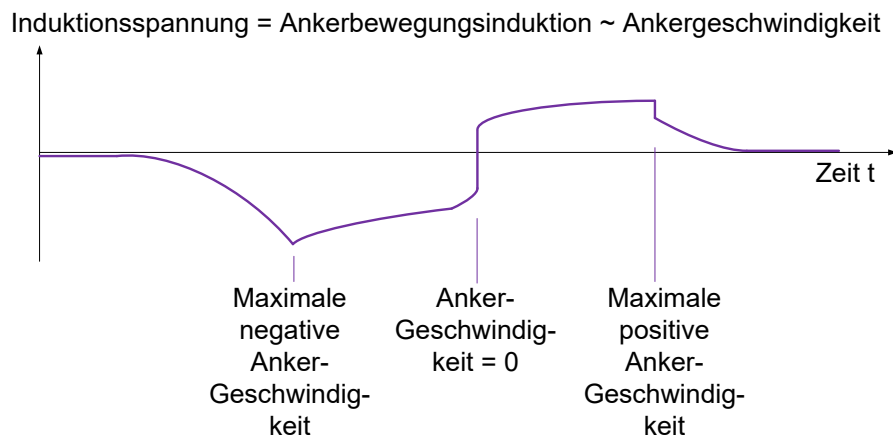
**Abbildung 21:** Spulenspannungsverlauf der aktiven und passiven Phase der Abkommutierung

Man kann den realen Spulenspannungsverlauf als Kopplung unterschiedlicher Induktionseffekte darstellen. Setzt man in einem Gedankenexperiment die Bewegungsinduktion zu 0 V, ergibt sich ein Kurvenverlauf mit unterschiedlich überlagertem exponentiellem Verhalten. Der Verlauf wird in Abb. 22 begrenzt durch die geometrischen Grenzverläufe der Positionen des maximalen und minimalen Luftspalts. Innerhalb des Grenzbereichs ist in einem ersten theoretischen Experiment jede fixierte Ankerzwischenposition eindeutig einem Kurvenverlauf zugeordnet. Im weiteren gedanklichen Experiment wird beim Schließvorgang eines beweglichen Einspritzventils jede Position des Ankers eindeutig einem definierten Zeitpunkt zugeordnet. Trägt man die aus dem zweiten Experiment ermittelten Zeitpunkte zum entsprechend der Position zugehörigen fixierten Kurvenverlauf auf, kann der Gesamtverlauf ohne Bewegungsinduktion ermittelt werden.



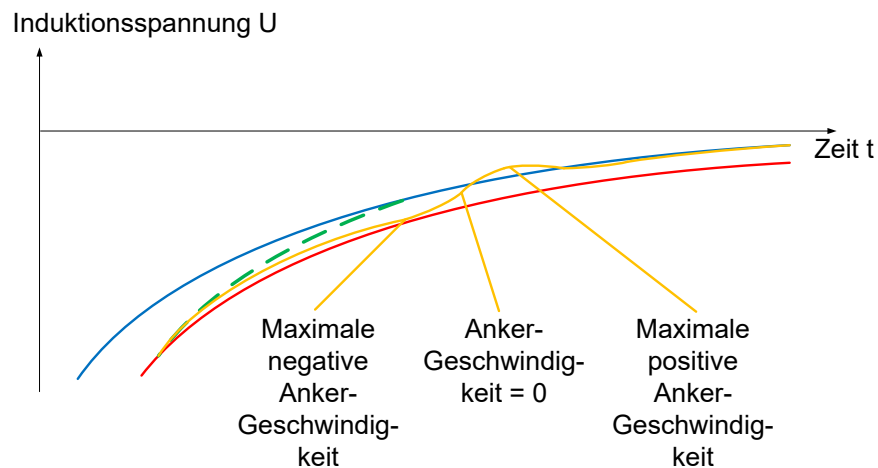
**Abbildung 22:** Darstellung des theoretischen Induktionsverlaufs  
ohne Bewegungsinduktion

Um die Kopplung mit der Bewegungsinduktion herzuleiten, wird die Geschwindigkeit des Ankers bei einem Einspritzventil in Abb. 23 ohne Ankerfreiweg skizziert dargestellt.



**Abbildung 23:** Darstellung des theoretischen Verlaufs der Bewegungsinduktion

Ersetzt man in erster Näherung die Geschwindigkeit vorzeichenbehaftet durch eine Spannung mit variablem Skalierungsfaktor, ergibt sich in Abb.24 folgender Gesamtspannungsverlauf



**Abbildung 24:** Prinzipbeschreibung der Superposition der Induktionsanteile

Dies ist eine quantitative Darstellung als Basis für die mathematische Analyse der Signalauswertung. Sie bildet die Möglichkeit, eine Korrelation des Signals zum hydraulischen Schließpunkt herzuleiten.

### 3.3.3 Sonderfall Batterie nach Boostphase

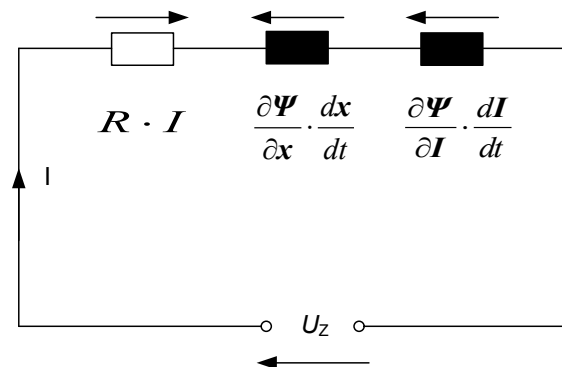
Ausgangspunkt ist der in der Boostphase erreichte Peakstrom. Wird elektronisch direkt nach dem Peakstrom auf die niedrigere Batteriespannung umgeschaltet, bewegt sich der Stromverlauf zeitlich auf den Ohmschen Grenzwert zu. Ist der Spulenstrom größer als der Wert, der sich statisch gemäß dem Ohmschen Gesetz mit der anliegenden Batteriespannung einstellen würde, ergibt sich zunächst ein Stromverlauf mit negativem Stromgradienten. Es wird im Abschnitt 5.6 gezeigt, dass sich je nach Höhe des eingestellten Peakstroms nach dem Stromabbau ein lokales Minimum ausbilden kann, anschließend der Strom ansteigt und dann den Ohmschen Grenzwert erreicht. Dieses Minimum, welches sich auch bei einem blockierten Einspritzventil ausbilden kann, lässt sich durch die magnetische Flussdynamik erklären. Die Quellen des Stroms sind zum einen die Batterieversorgung, zum anderen aufgrund des abfallenden Stroms auch ein magnetischer Feldabbau und somit eine teilweise Umwandlung der magnetischen Energie in elektrischen Strom.

### 3.4 Magnetische Beschreibung

Der zeitlich veränderliche verkettete magnetische Fluss beschreibt gemäß Gl. (3.19) partiell in Gl. (3.30) einen stromabhängigen und einen geschwindigkeitsabhängigen Anteil.

$$\underbrace{\frac{d\Psi(I(t), x(t))}{dt}}_{\substack{\text{Gesamte} \\ \text{zeitliche} \\ \text{Änderungen} \\ \text{des} \\ \text{magnetischen} \\ \text{Flusses} \\ \text{Gesamtinduktion}}} = \underbrace{\frac{\partial\Psi(x)}{\partial i} \cdot \frac{dI}{dt}}_{\substack{\text{Strom-} \\ \text{gradient-} \\ \text{abhängiger} \\ \text{Anteil der} \\ \text{Induktion}}} + \underbrace{\frac{\partial\Psi(I)}{\partial x} \cdot \dot{x}}_{\substack{\text{Anker-} \\ \text{geschwindig-} \\ \text{keits-} \\ \text{abhängiger} \\ \text{Anteil der} \\ \text{Bewegungs-} \\ \text{induktion}}} \quad (3.30)$$

Zur schaltungstechnischen Darstellung wird die Abb. 25 aus eingepprägter Zustandsspannung  $U_Z$  und den resultierenden internen Spannungsabfällen genutzt.



**Abbildung 25:** Interne Spannungsabfälle des Einspritzventils

---

Spannungsabfall am Ohmschen Spulenwiderstand:	$R \cdot I$	(3.31)
---	-------------	--------

Stromabhängige Gegeninduktion:	$\frac{\partial \Psi}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt}$	(3.32)
--------------------------------	--	--------

Geschwindigkeitsabhängige Gegeninduktion:	$\frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$	(3.33)
---	--	--------

Der sich einstellende Spulenstrom ist das Ergebnis aus der Höhe der Gegeninduktion, die je nach Änderung des Stroms durch unterschiedliche magnetische Flussänderungen erzeugt wird.

Die gesamte Induktion ist das Resultat des sich zeitlich verändernden magnetischen Gesamtflusses als Summe räumlicher und inhomogener Flussveränderungen.

Die Patentanmeldung von Moseler [Mos03] nutzt die Gl. (3.30), um die zeitliche Positionsveränderung des Ankers eines elektromagnetischen Aktuators zu bestimmen. Dazu wird ein Spannungssprung vorgegeben und der sich einstellende Strom aufgezeichnet. Bei diesem Verfahren wird der Widerstand berechnet und die differentielle Induktivität, der stromabhängige Anteil des magnetischen Flusses, iterativ mit Hilfe vorgegebener Grenzen ermittelt. Die luftspaltabhängige Veränderung des Flusses wird hierbei schon zuvor ermittelt.

Die Patentanmeldung von Weimer [Wei96] nutzt eine Hilfswicklung zur Lageerkennung eines Stellglieds, indem die magnetische Flussänderung durch zeitliche Integration der induzierten Spannung in der Spule herangezogen wird.

Eine Abschätzung des Nadelhubs eines Magneteinspritzventils erfolgt in der Veröffentlichung von Becker [Bec00]. Hier gehen bei der Ermittlung die Größen wie Wirbelstromkoeffizient und magnetischer Widerstand von Führungsluftspalt, Anker und Rückschluss mit ein.

Eine Nadelhubabschätzung, deren Berechnung auf Basis der unterschiedlichen internen Spannungsabfälle herrührt, wird in der Patentschrift von Sunwoo [Sun02] genutzt.



Die Offenlegungsschrift Liber [Lei00] ermittelt ebenfalls über Gl. (3.30) die Ankerposition und Ankergeschwindigkeit durch die Messungen der Spulenströme und Spulenspannungen von zwei gegeneinander arbeitende Aktuatoren, die je eine Rückstellfeder enthalten und einen gemeinsamen Anker besitzen.

Die Patentschrift Denk [Den11] beschreibt das Verhalten, bei dem sich beim hydraulischen Öffnungsvorgang die endgültige magnetische Flussverteilung in der eigentlichen Haltephase erst nach einer gewissen Einschwingzeit einstellt. Dies ist zu Beginn der elektrischen Haltephase im zeitlichen Stromregelverhalten erkennbar.

### 3.4.1 Induktionsanteil des Stromgradienten

Der Term in Gl. (3.32) ist das Produkt des Terms der differentiellen Induktivität und des zeitlichen Stromgradienten. Hier geht das nichtlineare Verhalten des ferromagnetischen Magnetmaterials ein. Da sich während der Ankerbewegung die Gesamtgeometrie des Magnetkreises ändert, wird dieser Term zu einer Schar von Termen mit jeweils fest zugeordneter Ankerposition.

Wird gedanklich für unterschiedlich fest gehaltene Ankerabstände der zeitliche Verlauf von Spulenstrom und Spulenspannung ermittelt, wird mit Hilfe von Gl. (3.30) der magnetische Phasenraum  $\Psi(I)$  bestimmt. Eine differentielle Analyse im Phasenraum sowie im Zeitraum kann sowohl quantitative als auch qualitative Aussagen über die Größenordnung dieses Induktionsterms ergeben.

Bei den Einspritzventilen mit und ohne Ankerfreiweg ist der einfachste realisierbare feste Abstand der im stromlosen Zustand mit maximalem Luftspalt verklebte Anker mit Nadel. Der zweite Zustand kann bei einem bereits bestromten Einspritzventil, das die hydraulische Endposition und somit den minimalen Ankerluftspalt schon erreicht hat, eingestellt werden.

Mit diesen experimentellen Randbedingungen werden die elektrischen Größen ermittelt und mit Hilfe eines speziellen Berechnungsverfahrens die magnetischen Flussgrößen berechnet. Daraus ergeben sich die beiden grenzwertigen magnetischen Flusskurven mit minimalem und maximalem Luftspalt.

### 3.4.2 Induktionsanteil der Ankerbewegung

Der Term in Gl. (3.33), der auch als Bewegungsterm interpretiert werden kann, ist das Produkt aus Ankergeschwindigkeit und der luftspaltabhängigen Flussänderungsgröße bei konstantem Strom.

Es wird in dieser Arbeit im Bereich der hydraulischen Öffnungsanalyse ein Verfahren beschrieben, auf einer bestimmten Stromhöhe in einer bestimmten Stromphase einen unterschiedlich geometrischen Restluftspalt darzustellen, und im magnetischen Flussbereich für unterschiedliche Luftspaltwerte den Einfluss bei gleichem Strom zu analysieren.

Die Patentschrift von Denk [Den15d] erläutert die Detektion des Öffnungszeitpunktes mittels einer elektrischen Ansteuerung, die mit einer Boostphase beginnt. Dieser schließt sich eine weitere Boostphase an, deren Spannungswert gegenüber der ersten Boostspannung niedriger ist. Der Wert und die Zeit der beiden Versorgungsspannungen ist derart gewählt, dass das Öffnungsereignis in der zweiten Phase stattfindet und in diesem Zeitbereich der Spulenstrom annähernd zeitlich konstant ist. Somit kann im Stromverlauf primär nur die Induktionsänderung der Ankerbewegung wirken.

## 3.5 Leitfähigkeit des Einspritzventils

Da beide beschriebenen Selbstinduktionsterme einen zeitlichen Änderungsanteil beinhalten, werden nach Gl. (3.3) im Magnetmaterial durch die sich ergebenden Flussänderungen intern Spannungen erzeugt. Besitzt das ferromagnetische Material eine Leitfähigkeit, werden mit Gl. (3.18) Ströme induziert, die wiederum gemäß Gl. (3.1) ein eigenes Feld bilden.

Dieses Feld wirkt sowohl beim Aufbau als auch beim Abbau der Magnetisierung verzögernd. Um diese verzögernden Effekte zu minimieren, wird unter anderem ein Verfahren zum Betreiben eines Einspritzventils vorgestellt, das durch eine schwache Anregung einen quasistationären Magnetzustand erzeugt, bei dem die Wirbelstromanregungen unterdrückt werden.

## 4. Messsysteme und Auswertung

### 4.1 Prüfaufbauten

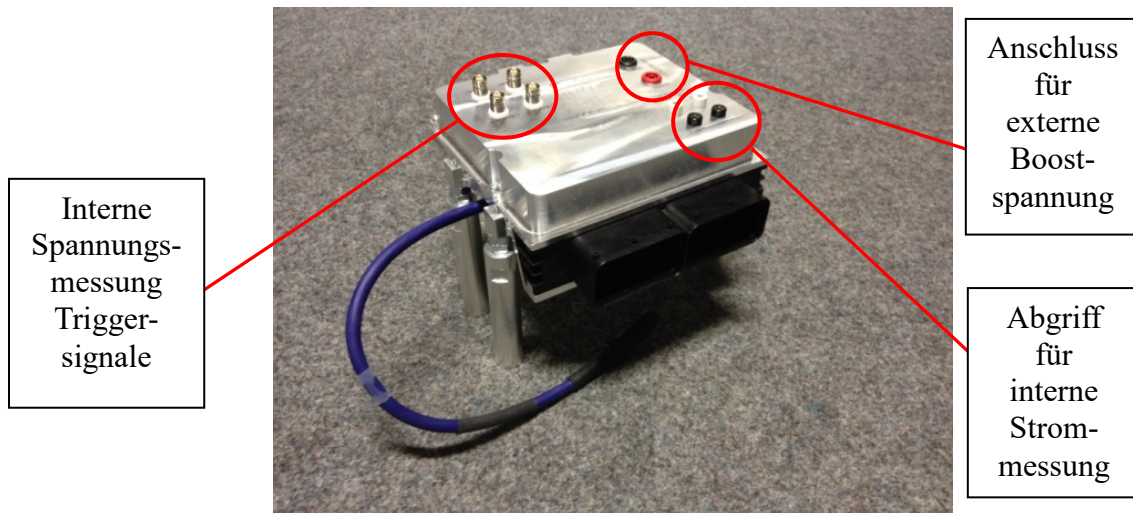
Die Untersuchungen erfolgen in zwei unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen. Der Laborplatz bietet die Möglichkeit, das Einspritzsystem ohne Kraftstoff und Druck unter “Trockenbedingungen“ zu untersuchen. Der Einspritzventilsystemprüfstand ist in der Lage, unter definierten Kraftstoffdruckbedingungen zusätzlich zu den elektrischen Größen Spulenstrom und Spulenspannung die hydraulischen Größen Kraftstofffluss und Kraftstoffmenge zeitlich zu erfassen.

Die untersuchten Objekte sind Musterteile und Serienteile aus der eigenen Einspritzventilfertigung sowie Serieneinspritzventile von Mitbewerbern. Sie sind in Tab. 2 zur Übersicht dargestellt.

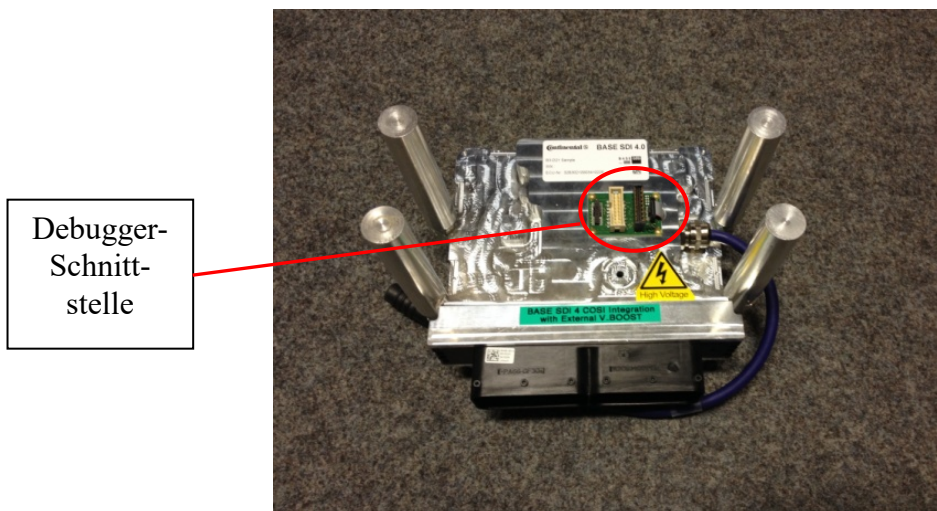
Einspritzventil	Konzept	Bemerkungen
I	Einspritzventil ohne Ankerfreiweg	Mit Nadelhubsensor
II	Einspritzventil mit Ankerfreiweg	-
III	Einspritzventil mit Ankerfreiweg	-
IV	Einspritzventil ohne Ankerfreiweg	Mit Nadelverstelleinheit
V	Einspritzventil mit Ankerfreiweg	Mechanisch blockiert
VI	Einspritzventil mit Ankerfreiweg	-
VII	9 Einspritzventile mit Ankerfreiweg	Inklusive Einspritzventil V
VIII	Spulenkörper Prototyp	-
IX	Einspritzventil ohne Ankerfreiweg	Mechanisch blockiert
X	Einspritzventil ohne Ankerfreiweg	-

**Tabelle 2:** Übersicht der eingesetzten Einspritzventile und des Prototyps

Als elektronische Systemkomponente wird in Abb. 26 und Abb. 27 eine Motorsteuerung mit erweiterten Messfunktionalitäten verwendet. Dargestellt sind Frontansicht und Unterseite des elektronischen Steuergeräts mit Kennzeichnung der funktionalen Erweiterungen.



**Abbildung 26:** Instrumentalisierte Motorsteuerung Draufsicht

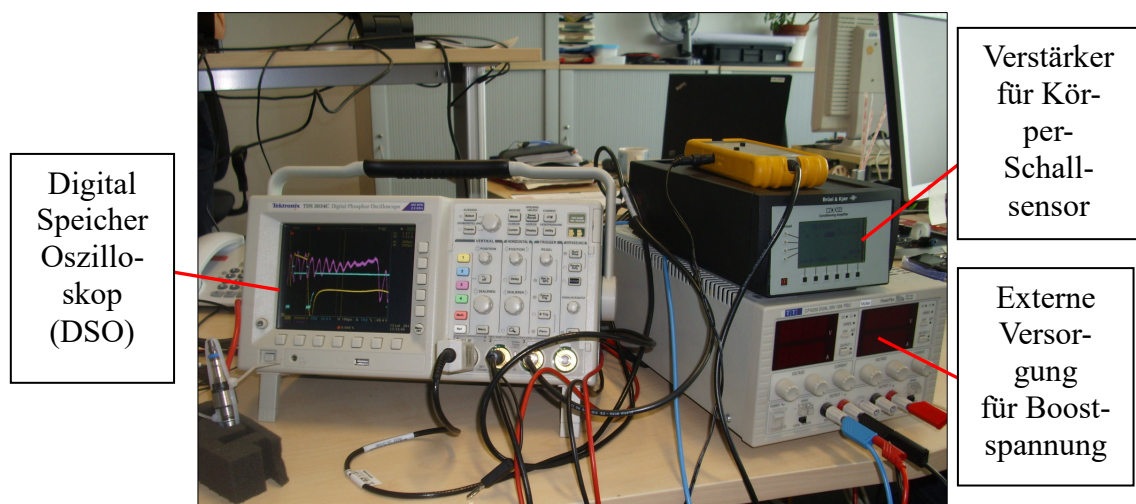


**Abbildung 27:** Instrumentalisierte Motorsteuerung Rückansicht

Die Motorsteuerung ist in der Lage, bis zu vier Einspritzventile anzusteuern. Boost- und Batteriespannung sind individuell einstellbar. Auf die elektrischen Einspritzventilkenngrößen Spulenstrom und Spulenspannung kann entweder steuergeräteintern zugegriffen werden oder extern mittels eines Spannungsdifferenzastkopfs und einer Stromzange.

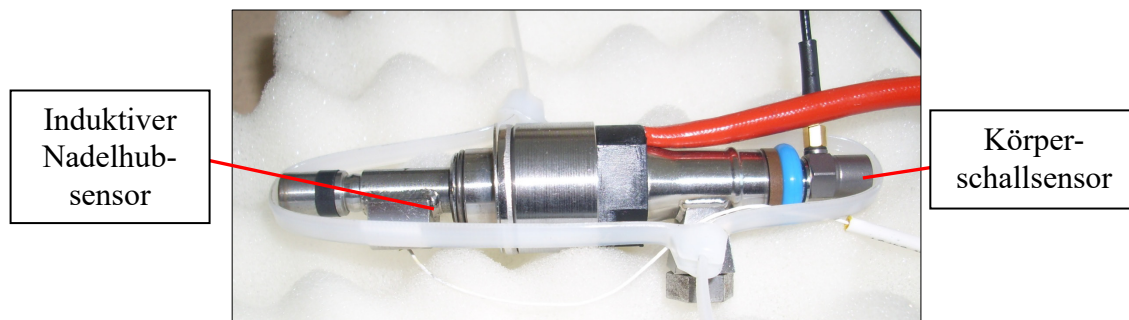
Als Software kommen zwei mögliche Module zum Einsatz. Die sogenannte Fahrsoftware stellt die Fahrzeugsoftware dar, mit der bei entsprechender Umgebungsbedingung die dynamischen experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden. Hier erfolgt die zeitliche Einstellung der Strom- und Spannungsprofile über ein leistungsfähiges Applikationstool. Die entsprechende zusätzlich notwendige Applikationsschnittstelle ist an der Motorsteuerung vorgesehen.

Als zweites Softwaremodul kommt eine Testsoftware zum Einsatz. Diese Software besitzt einen nicht dynamischen und vollkommen linearen Aufbau. Zum Einsatz kommt diese Art Software in der Motorsteuerungsfertigung, um alle integrierten Hardwarefunktionalitäten einzeln ansprechen und testen zu können. Hiermit werden wie in Abb. 28 im Labor statische Strom- und Spannungsprofile generiert, die so in der Fahrsoftware nur mit hohem sensorischen Aufwand darstellbar wären. Das entsprechende Applikationstool kommuniziert direkt mit Hilfe von Einzelkommandos über den Mikrocontroller mit dem Einspritzmodul. Die Möglichkeit der sensorischen Erfassung des Anker- und Nadelhubs wird in Abb. 29 durch Detektion der beschleunigten Masse des Einspritzventils mit einem Körperschallsensor und mit optischer oder induktiver Erfassung der Nadelbewegung abgedeckt.



**Abbildung 28:** Messaufbau

Abb. 29 eines präparierten Einspritzventils für Trockenmessung im Labor

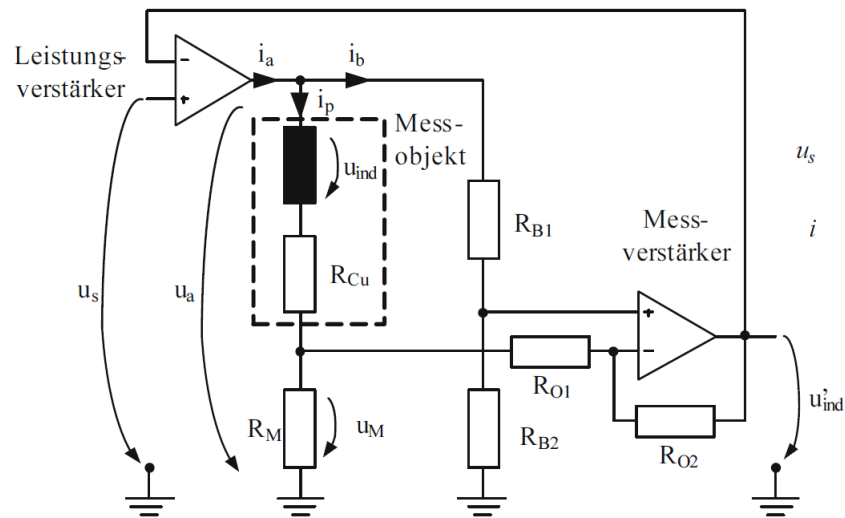


**Abbildung 29:** Instrumentalisiertes elektromagnetisches Einspritzventil I  
mit Nadelhubsensor

An den Kraftstoffprüfständen wird das Einspritzventil unter hydraulischen Bedingungen mit einstellbarem Kraftstoffdruck untersucht. Die eingesetzten hydraulischen Messgeräte werten den Kraftstofffluss aus. Die zeitliche Integration des Flusses ergibt die in das Messvolumen eingespritzte Menge. Der nominale Kraftstoffdruck und der durch die Kraftstoffentnahme aus der Kraftstoffleitung entstehende Druckabfall werden sensorisch miterfasst.

## 4.2 Magnetische Flussmessung

In Kallenbach [Kal12] wird das Prinzip der Einspulenmessung beschrieben, die es in Abb. 30 ermöglicht, individuell gestaltete magnetische Spulenaktuatoren hinsichtlich ihrer Gesamtreaktion bei elektrischer Erregung magnetisch zu analysieren.



**Abbildung 30:** Prinzip der Einspulenmessung zur Flussberechnung

Die Anordnung nutzt die physikalische Tatsache aus, dass das verwendete Windungsmaterial der Einspritzventile aus metallischen Leitern wie Kupfer aufgebaut ist und einen realen elektrischen Widerstand aufweist. Dieser wirkt in seiner elektrischen Eigenschaft als ein in Reihe zum induktiven Anteil geschaltetes Ohmsches Element. Ist der Ohmsche Widerstand hinreichend genau ermittelbar, kann über Gl. (4.1) der verkettete magnetische Fluss ermittelt werden.

$$\psi = \int_0^t (U(t) - R(\vartheta) \cdot I(t)) dt \quad (4.1)$$

Die genaue Bestimmung des zu berücksichtigen Ohmschen Widerstands lässt sich experimentell und rechnerisch mit verschiedenen Verfahren ermitteln.

Der Widerstand kann vor der Messung über eine Vierleitermessung bestimmt werden oder aktiv durch Einprägen eines konstanten Stroms und Messung der resultierenden Spulenspannung, wie es auch in der Offenlegungsschrift von Glötzl und Denk [Glö12] beschrieben wird. Der Ohmsche Anteil, der beim Stromfluss Joulesche Wärme erzeugt, beeinflusst wiederum den zur Berechnung notwendigen Widerstand.

Indirekte Ansätze, wie sie in dieser Arbeit auch verwendet werden, versuchen über definierte Anschlussbedingungen bei der Flussintegration den verketteten Fluss zu bestimmen.

Ein Ansatz ist die Tatsache, dass vor und nach einer definierten Abschaltzeit des elektrischen Betriebs des Einspritzventils die Magnetisierung wieder den gleichen Ausgangswert erreichen muss. Eine magnetische Flussintegration beginnt und endet somit beim Wert 0 Vs. Die Flusskurve ist in sich geschlossen.

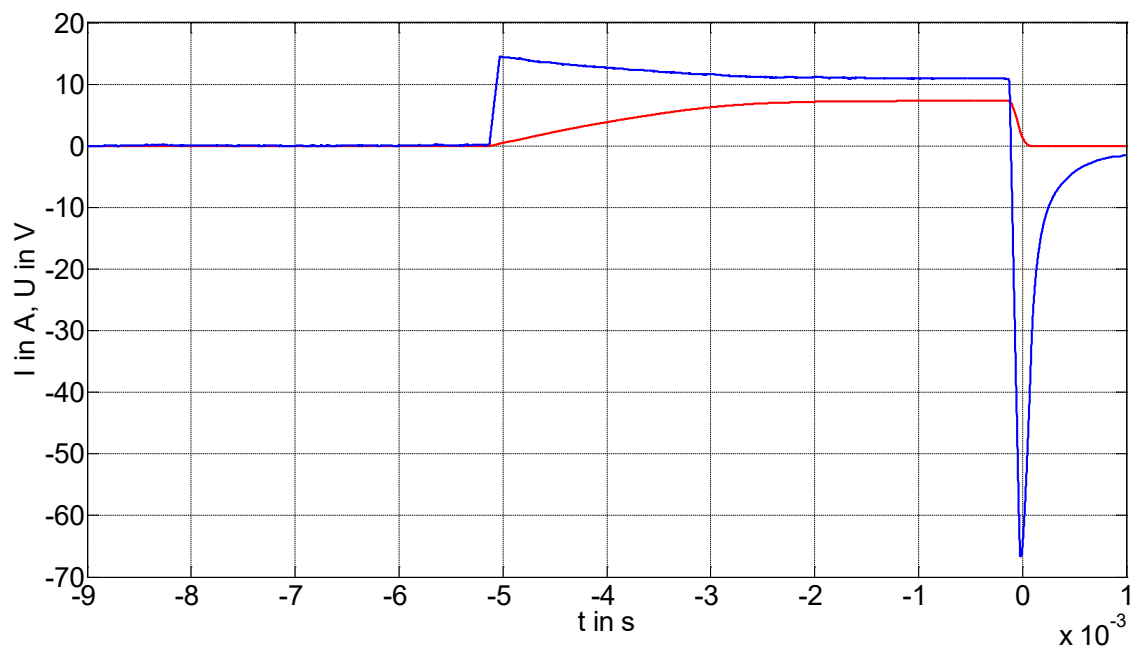
In der Arbeit von Radler [Rad40] wird der gewünschte Strom im zeitlichen Verlauf gewählt. Hier wird die dafür notwendige Versorgungsspannung nachgestellt. Das magnetische Flussmessgerät Maghyst der Firma Kendrion [Ken16] nutzt ein Verfahren, bei der die induzierte Spannung und somit der zeitlich veränderte magnetische Fluss vorgegeben wird.

Die in der elektronischen Motorsteuerung eingesetzte Hardware schaltet zeitlich zur Verfügung stehende Spannungen an das Einspritzventil. Das Kriterium für die Wahl einer anderen Spannung sind die Stromwerte, die im zeitlichen Stromverlauf erreicht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen entstehen somit auch bei der Berechnung nach Gl. (4.1) unterschiedliche magnetische Flüsse.

Alle Verfahren besitzen die Eigenschaft, eine hohe Empfindlichkeit in der Berechnung des Flusses bei der Vorgabe des elektrischen Widerstands zu haben. Im Einsatzgebiet der elektromagnetischen Einspritzventile kann diese Tatsache im Umkehrschluss dazu dienen, dass unter bestimmten Rahmenbedingungen eine unkorrekte Vorgabe des Widerstands zu physikalisch nicht plausiblen Lösungen führt und somit der nicht korrekte Widerstand erkannt wird.

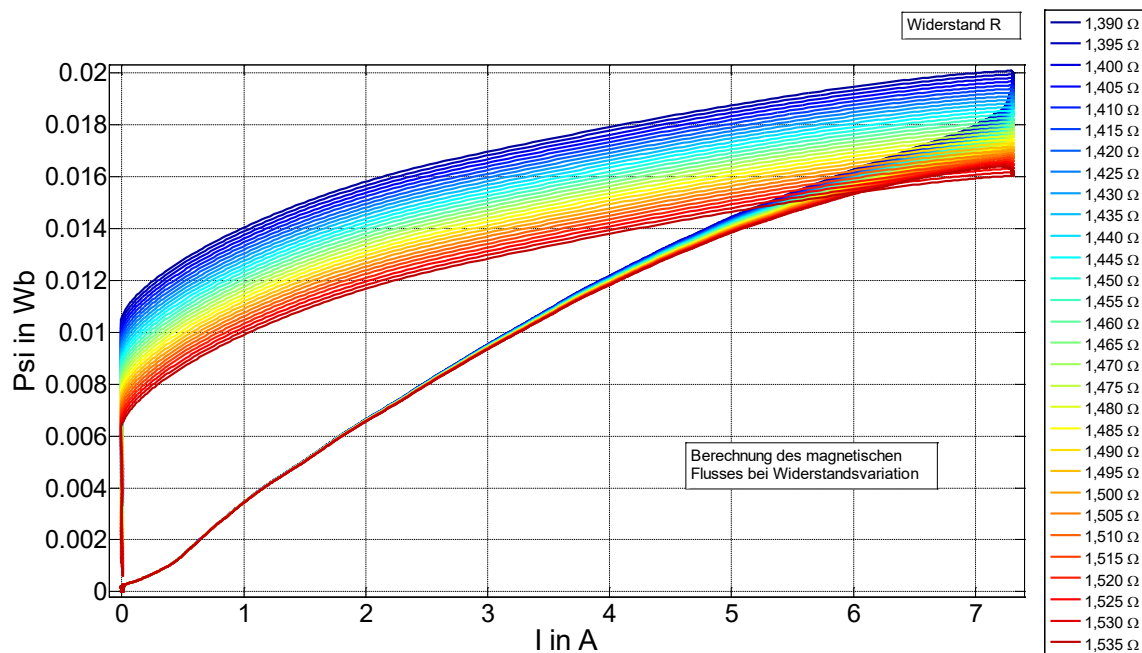
Die Patentschrift von Denk [Den15b] nutzt diese Tatsache aus. Als Rahmenbedingung wird in Abb. 31 eine Spannungsbeaufschlagung von 14 V gewählt. Die Beaufschlagung erfolgt elektrisch mit 5 ms. Als Einspritzventil dient das in hydraulischer Nulllage blockierte Einspritzventil V, um die Bewegungseffekte auszuschließen. Im Experiment werden Spulenstrom und Spulenspannung aufgezeichnet.





**Abbildung 31:** Spulenstromverlauf und Spulenspannungsverlauf für die Flussmessung

Mit Hilfe von Gl. (4.1) wird der magnetische Fluss ermittelt. Die Berechnung erfolgt mit einer Widerstandsvorgabe, die sich im Bereich von  $1,390 \, \Omega$  bis  $1,535 \, \Omega$  schrittweise um  $50 \, \text{m}\Omega$  verändert. Das Ergebnis zeigt die Flussberechnung in Abb. 32 mit jeweils um  $50 \, \text{m}\Omega$  verändertem Widerstand. Das Resultat ergibt bei kleinen Stromwerten nur eine geringe Abweichung im Fluss, die sich mit ansteigendem Spulenstrom verstärkt, bis schließlich der Ohmsche Grenzwert erreicht wird.



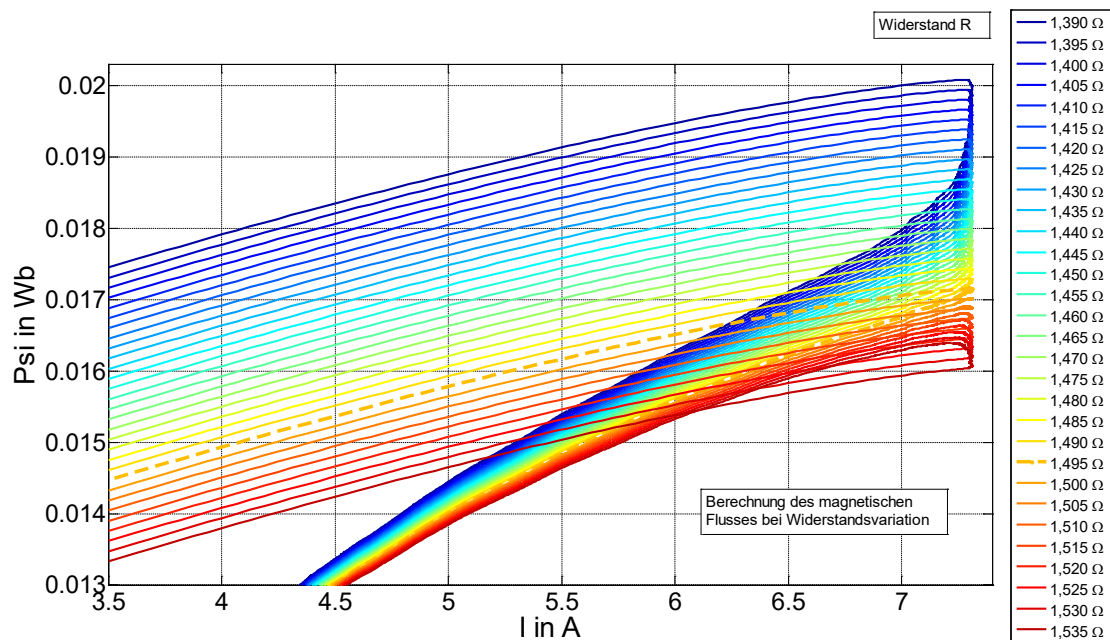
**Abbildung 32:** Flussberechnungsergebnis mit konstanter Widerstandsvariation

Eine weitere Analyse im relevanten Bereich zeigt in Abb. 33 die genaue Betrachtung und Interpretation des Phasenraums in der Region des Ohmschen Grenzwerts.

Bei dem vorliegenden magnetischen Aufbau des Einspritzventils sollte ein Erhöhen des Spulenstroms zu einem Magnetisierungsverlauf führen, der einem Sättigungswert zustrebt. Die Phasenkurve besitzt ein rechtsgekrümmtes Verhalten mit einer mit steigendem Strom schwächer werdenden Krümmung. Falls die Erwärmung des Einspritzventils einen Einfluss auf die Messung hat, sollte sich dies in einem Absinken des Maximalstroms aufgrund des Ohmschen Grenzwerts und des Maximalflusses zeigen.

Die Flussabsenkung ist bei allen berechneten Verläufen nicht erkennbar. Damit kann eine Widerstandsänderung durch Erwärmung im Experiment ausgeschlossen werden.

Somit ist die gestrichelte Kurve bei 1,495  $\Omega$  die physikalisch plausibelste, da sie bei Maximalstrom einen Maximalfluss aufweist und keine Änderung im Krümmungsverhalten bzw. einen Wendepunkt, aufweist.



**Abbildung 33:** Relevanter Analysebereich zur korrekten Widerstandsbestimmung

Das Verfahren ist je nach der Schrittweite der Ohmschen Werte beliebig verfeinerbar und ermöglicht Messgenauigkeiten im Bereich der Größenordnung von einem  $\text{m}\Omega$ .

### 4.3 Auswertung

Das Programmpaket MATLAB [Mat16] ist in der Lage, große Datenmengen in geeigneter Weise aufzuarbeiten und mathematisch zu analysieren. Das Prinzip der Berechnung des verketteten Flusses kann mit Hilfe von MATLAB im Hinblick auf Anschlussbedingungen vielfältig verändert und der Grad an Genauigkeit iterativ erarbeitet werden.

Die Rohdaten bei hydraulischen Messungen stammen von einem Messdatenerfassungssystem der Firma Dewetron [Dew17]. Hier werden Spulenspannung, Spulenstrom, Kraftstoffrate und optional Kraftstoffdruck zueinander synchron und digital aufgezeichnet. Eine Messung beinhaltet je nach gewählter zeitlicher Datenauflösung etwa 32 Einzeleinspritzungen. Die Datenaufarbeitung beinhaltet hier eine Mittelwertbildung über alle zugehörigen Einzeleinspritzungen.

Bei den Trockenmessungen werden Spulenspannung, Spulenstrom und optional Nadelhubsensorsignal oder Beschleunigungssensorsignal im Aufzeichnungsmodus „Einzelaufnahme“ (im Englischen Single Shot) digital aufgezeichnet. Die eigentliche Auswertung und graphische Darstellung erfolgt durch die Software MATLAB je nach Schwerpunkt der Analyse mittels zeitlicher Darstellung der Größen Spulenspannung, Spulenstrom, Rate, Beschleunigung, Nadelhub und verketteter magnetischer Fluss. In der Phasenraumdarstellung wird wie in Abb. 33 der Spulenstrom über den verketteten Fluss aufgetragen.

#### **4.4 Simulation**

Das Programmpaket Maxwell der Firma ANSYS [Max16] kommt primär zur Kraftberechnung zum Einsatz. Es nutzt die Maxwell'schen Gleichungen in einem frei definierbaren Gitternetz und die daraus notwendigen elektromagnetischen Anschlussbedingungen, um die Feldgrößen zu ermitteln.

Da im Einspritzventil ferromagnetisches, nicht lineares Material zum Einsatz kommt, spielen die magnetischen Eigenschaften in der Modellierung eine wesentliche Rolle für die Genauigkeit des Modells. Durch die vorliegenden Symmetrieeigenschaften kann durch zweidimensionale Ansätze die Rechenzeit verkürzt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt in der Simulationsunterstützung ist der Bereich der Verfeinerung und Optimierung des Modells. Reale Verifikationen mit Experimenten dienen der Anpassung physikalischer Modellparameter, um die Simulationsergebnisse in Einklang mit den Ergebnissen der Messung zu bringen.

Die Simulation ist in der Lage, einen Einblick in die internen Magnetisierungszustände und deren dynamische Veränderungen zu geben. Messtechnisch nicht direkt zugängliche physikalische Werte wie Wirbelströme und deren Wirkung auf die magnetische Flussverteilung leisten einen Beitrag zum Verständnis des Auf- und Abbaus der Magnetkraft und damit zu den hydraulischen Eigenschaften des Einspritzventils.

Da die hydraulischen und mechanischen Abläufe, die im Einspritzventil wirken, unterschiedlichen physikalischen Differentialgleichungen genügen, kommen weitere Programme zum Einsatz, die in der Form von Co-Simulationen die Kopplung zu dem elektromagnetischen Simulationsteil ermöglichen.

Frühe transiente Berechnungen eines Magnetaktuators erfolgen in Lequesne [Leq90], bei der der Aktuator in geometrisch unterschiedliche Bereiche mit verlustbehafteten Flussverteilungen diskretisiert wird. Dazu zählen Streufeldverluste sowohl am Arbeitsluftspalt als auch am Übergang zwischen den Magnetmaterialien.

In der Dissertation von Ströhla [Str02] werden mit Hilfe der Netzwerkmethodene Magnetaktuatoren entworfen und simuliert. Die Methode wird im Detail beschrieben und verschiedene Arten der Modellierung untersucht.

Die Arbeit von Schultz [Sch06] entwirft mit Hilfe der FEM das Verhalten von Schaltmagneten und untersucht unter anderem die Auswirkung der Art der Vernetzung im Luftspalt.

Herrmann [Her08] entwirft und berechnet simulationsgestützt unter anderem auch Magnetaktuatoren und untersucht unterschiedliche Regelmethode dieser Aktuatoren.

Ein Verfahren in der Offenlegungsschrift Denk [Den14c] setzt die Simulation zur Verifikation eines Detektionsverfahrens ein, bei der mit Hilfe einer kleinen Spannungserregung der Anker eines Einspritzventils mit Ankerfreiweg bewegt wird. Der Anker wird aus seiner stromlosen Endposition in Richtung Nadelstellung geführt. Hat er die Nadel erreicht, wird er durch diese gestoppt. Dieses Stoppen wird im Stromverlauf des Einspritzventils detektiert. Im Abschnitt 5.6 wird dieses Verfahren mit kleiner Spannungserregung angewendet.



## 5. Hydraulisches Öffnen

### 5.1 Beschreibung

Das hydraulische Öffnen unterscheidet sich im Einspritzventilkonzept. Die zur Verfügung stehenden elektrischen Phasen sind nach Abb. 16 die Boostphase in Abb. 17, die Batteriephase nach Abb. 18 und die Phase Freilauf-gegen-Masse in Abb. 19.

Das Konzept des Einspritztreibers in Abb. 14 ermöglicht eine unipolare Bestromung des Einspritzventils. Die in der Dissertation von Rosenbaum [Ros11] behandelte Remanenzinduktion von ferromagnetischen Materialien führt im Anwendungsfall des Einspritzventils zu einer remanenten Magnetisierung. Diese bleibt im Normalbetrieb des Einspritzventils erhalten. Ein Verlust der Remanenz könnte z.B. durch Erwärmung des Injektors über die Curie-Temperatur erfolgen. Die in Kallenbach [Kal14] angegebene Curie-Temperatur von Eisen liegt bei 770 °C. Diese Temperaturen werden innerhalb des magnetischen Teils des Einspritzventils nicht erreicht. Nach Term (4) in Gl. (3.15) führt dies zusätzlich zur Reluktanzkraft in Gl. (3.17) zu einem additiven Remanenzkraftanteil nach Gl. (3.15) Term (2), der das hydraulische Öffnen begünstigt.

Bei dem Einspritzventil mit Ankerfreiweg wird nach Abschnitt 2.5.2 Abb. 12 in der Boostphase zunächst der Anker bei einer schwachen Gegenfederkraft im Ankerfreiwegbereich beschleunigt. Die Reluktanzkraft, die diese Beschleunigung hervorruft, kann im vorliegenden Fall des Einspritzventils mit einer flachen Ankergeometrie und einem flachen Ankerjoch angegeben werden. Sie nimmt nach Kallenbach [Kal12] mit dem umgekehrt proportionalen Quadrat des Luftspalts zu. Die Ankerbeschleunigung erfolgt kontinuierlich über den gesamten Ankerfreiweg mit sich verkleinerndem Luftspalt.

Ist der Ankerfreiweg überwunden, erfolgt der Moment der Nadelmitnahme und damit der Beginn des hydraulischen Öffnungsvorgangs. Wegen der zusätzlich zu beschleunigenden Masse der Nadel, der aufgrund der Nadelöffnung hydraulisch wirkenden Kraft sowie der starken Schließkraft der Kalibrationsfeder kommt es zu einem mechanischen Impulsübertrag des Ankers und einer signifikanten Änderung der Ankergeschwindigkeit. Der Beginn

des hydraulischen Öffnens wird zusätzlich zur Reluktanz- und Remanenzkraft durch den Impuls der beschleunigten Ankermasse unterstützt. Mit diesem zusätzlichen Impulskraftterm kann die maximale Magnetkraft bereits vor dem Ende der Öffnung wieder abklingen.

Elektrisch bedeutet dies, dass der Öffnungsbeginn auch nach der Boostphase in der elektrischen Zustandsphase Freilauf-gegen-Masse oder Freilauf-gegen-Batterie stattfinden kann. Die weitere Öffnung der Nadel verringert die einwirkende hydraulische Kraft, da die effektive Durchflussfläche des Kraftstoffs sich vergrößert. Der sich weiter verringernde Luftspalt und der abklingende Freilaufstrom erzeugen eine resultierende Magnetkraft, die Anker und Nadel gegen die Schließfederkraft bis zum Ankeranschlag weiterführt. Der Anschlag entspricht der hydraulischen Endposition der Nadel, die in der Kraftstoffrate den statischen Durchflussbereich kennzeichnet.

Da der Anker und die Nadel die Endposition mit einer Geschwindigkeit ungleich 0 m / s erreichen, führt der Anker zwangsläufig einen durch die Magnetkraft reduzierten Prellvorgang aus. Eine zusätzliche Dämpfung der Bewegung des Ankers kann durch die Verdrängung von sich im Luftspalt befindlichem Kraftstoff erzeugt werden. Die Nadel kann sich durch die Beschleunigung zeitlich begrenzt über ihre statische Position hinwegbewegen und wird durch die entgegenwirkende Kraft der Kalibrationsfeder abgebremst, gestoppt und zurückgeführt. Die Nadel nimmt danach ihre endgültige hydraulische Endposition ein.

Um diesen Prellvorgang magnetisch zu reduzieren, wird üblicherweise der elektrischen Boostphase eine erste erhöhte elektrische Haltephase nach Keilig [Kei04] angelagert. Der Strom ist gegenüber der eigentlichen Haltephase höher, um durch die damit verbundene höhere Magnetkraft das sich noch im Prellen befindliche Anker-Nadel-System zusätzlich zu dämpfen.

Für das Einspritzventil ohne Ankerfreiweg ist der zeitliche Ablauf des hydraulischen Öffnens nach Abschnitt 2.4.2 Abb. 9 bis auf den fehlenden Anfangsimpuls des Ankers identisch. Der zur Öffnung beitragende Kraftterm erfolgt ohne den Impulskraftterm und somit nur mit der Reluktanzkraft.



## 5.2 Definition der Untersuchungen

Für die Untersuchungen im hydraulischen Öffnungsbereich kommen Einspritzventile mit Ankerfreiweg von Mitbewerbern sowie aus eigener Fertigung zum Einsatz. Lediglich die Untersuchung mit der mechanischen Verstelleinheit des Ankerhubs in Abschnitt 5.5 erfolgt mit einem Einspritzventil ohne Ankerfreiweg.

Im Abschnitt 5.3 ist es das Ziel, unter realen Kraftstoffdruckbedingungen die Boostphase in ihrem Einfluss elektrisch und hydraulisch zu untersuchen und zu charakterisieren.

In der Dissertation von Ulm [Ulm07] wird als charakteristisches Merkmal ein relativer Fehler über hydraulische Mengen und der dazugehörigen Einspritzzeit genutzt, der die optimalen Einstellwerte der Boostspannung und des Peakstroms eines Einspritzventils ermittelt.

Die Untersuchung im Abschnitt 5.3 dient dazu, durch die Variation der Boostspannung und des Peakstroms weitere Kenntnisse im Hinblick auf die benötigte Boostenergie und den Abhängigkeiten der gemessenen hydraulischen Öffnungszeiten „Beginn hydraulisches Öffnen“ und „Ende hydraulisches Öffnen“ zu erarbeiten.

Abschnitt 5.4 behandelt ein veröffentlichtes Verfahren, unter Laborbedingungen ohne Kraftstoff mit Variationen in der Höhe des Peakstroms ein beliebiges elektromagnetisches Einspritzventil in seinen elektrischen und magnetischen Eigenschaften charakterisieren zu können und somit für den Fall „Trockenbetrieb“ einen optimalen Peakstrom einstellen zu können. Dieser ermittelte Peakstrom wird darüber hinaus im Hinblick auf sensorische Eigenschaften zur Öffnungserkennung bewertet.

Mit dem instrumentierten Einspritzventil in Abschnitt 5.5 wird durch Analyse des Spulenstroms und des dazugehörigen berechneten magnetischen Flusses gezeigt, wie sich bei Variation des Ankerluftspalts von 0 mm bis 3 mm diese Größen charakteristisch verändern. Dies wird zur Interpretation der Größen unter „realen“ Luftspaltbedingungen genutzt. Das Einspritzventil ist aufgrund der Art der Instrumentierung nicht in der Lage, Kraftstoff einzuspritzen.

Die Möglichkeit, zeitlich nach der Boostphase die Zustandsspannungen Batteriespannung oder Freilauf-gegen-Masse einstellen zu können, wird elektrisch und magnetisch in Abschnitt 5.6 untersucht und charakterisiert. Dies dient der Ermittlung des elektrisch „optimaleren“ Stromprofils und kann aufgrund des Untersuchungsschwerpunkts ohne Kraftstoffdruck durchgeführt werden.

Ein weiteres Verfahren, über die magnetische Flussmessung mit der Variation des Peakstroms den Ankeraufschlag beim hydraulischen Öffnen zu ermitteln, wird in Abschnitt 5.7 beschrieben.

Mit dem Ziel, weitere detailliertere Kenntnisse über den Öffnungsvorgang durch die magnetische Analyse gewinnen zu können, wird in Abschnitt 5.8 ein Verfahren angewendet, das ausschließlich die speziell im Kraftfahrzeug vorliegende Batteriespannung nutzt und mit geringem bzw. fehlendem Kraftstoffdruck arbeitet. Es stellt einen Betrieb des Einspritzventils ohne Boostspannung dar, der Vorteile in der Analyse des Öffnungsvorgangs bewirkt. Diese Vorteile werden aufgezeigt und deren Nutzen beschrieben.

### 5.3 Einfluss der Boostparameter

Untersucht wird das hydraulische und elektrische Verhalten des Einspritzventils bei unterschiedlichen Boostspannungen  $U_{boost}$  und Peakströmen  $I_{PK}$  unterhalb eines nominalen Werts von 65 V. Die Vereinbarung der Nutzung von Großbuchstaben für den Peakstrom ergibt sich durch die Möglichkeit der individuellen Kalibration mit einem Bedienungsstool.

Ziel ist es, mit den Kriterien „stabile hydraulische Öffnung“ und „minimal benötigte Boostenergie“ die Kombination aus Boostspannung und Peakstrom zu ermitteln, welche die geeignetste für das vorliegende Einspritzventil im betrachteten hydraulischen Druckbereich ist.

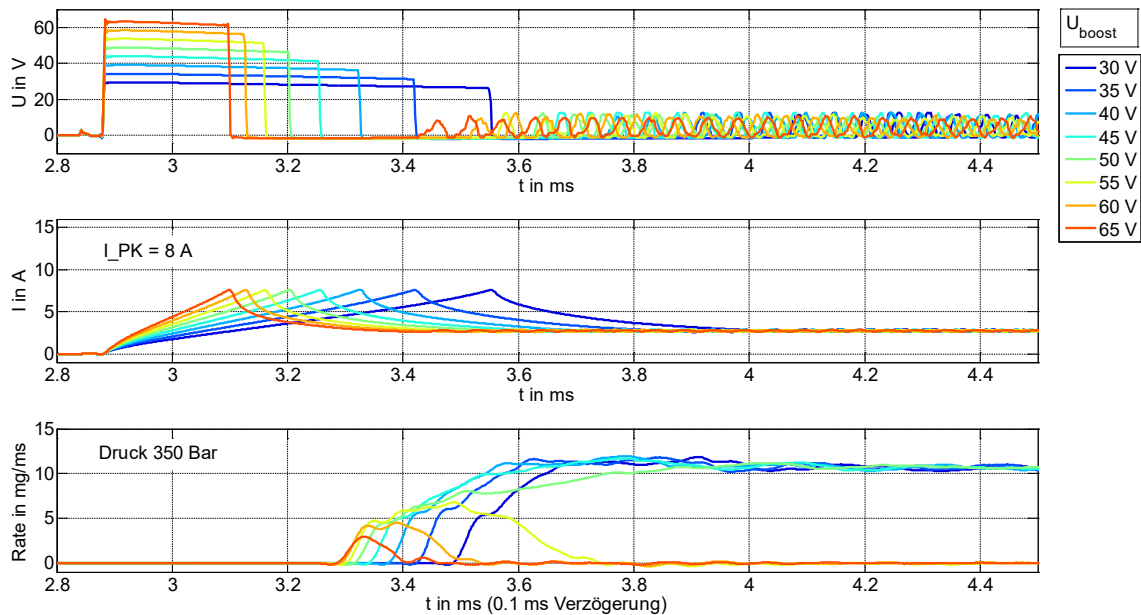
Die theoretische Überlegung nach Gl. (3.22) zeigt bei einer schrittweisen Absenkung der Boostspannung  $U_{boost}$  durch die Verkleinerung der Erregung einen zeitlich verlängernden Stromverlauf bis zum Peakstrom  $I_{PK}$ .

Erwartet wird ein zeitlich kleiner werdender Stromgradient und eine größer werdende Boostzeit  $t_{boost}$ . Damit verbunden wird sich gemäß Gl. (3.1) eine geringere Dynamik im magnetischen Flussaufbau einstellen. Bezogen auf den jeweiligen Peakstrom  $I_{PK}$  führt dies zu einem zeitlich veränderten Öffnungsverhalten. Um den Einfluss des eingestellten Peakstroms untersuchen zu können, wird dieser in der Höhe variiert. Weiter analysiert wird die Größe der benötigten Boostenergie auf die Stabilität des hydraulischen Öffnens und den hydraulischen Öffnungspunkten.

Das untersuchte Einspritzventil ist das Einspritzventil mit Ankerfreiweg II. Der Systemdruck liegt bei 360 bar, was bei einem Gegendruck des Einspritzratenmesssystems von 10 bar einem Einspritzdruck von 350 bar entspricht.

Die Ansteuerung der ECU erfolgt mittels des Applikationstools INCA der Firma ETAS [Inc16], das die entsprechende Parametrisierung des Stromprofils dem Einspritztreiber digital übermittelt. Der interne DC-DC-Wandler des Steuergeräts wird deaktiviert. Die Boostspannung wird extern mit einem Netzteil vom Typ CPX200 der Firma TTI [Thu16] zugeführt und je nach vorgegebener Boostspannung variabel eingestellt. Die Variation der Boostspannung erfolgt in 5 V-Schritten im Bereich von 30 V bis 65 V. Die Variation des Peakstroms erfolgt in 1 A-Schritten im Bereich von 8 A bis 15 A. Die Aufzeichnung umfasst die Spulenspannung, den Spulenstrom und den Ratenverlauf. Pro Aufzeichnungsvorgang werden 15 Einspritzungen aufgezeichnet und deren Mittelwert gebildet.

Die Darstellung der Messung mit einem nominalen Kraftstoffdruck von 350 bar erfolgt in Abb. 43 exemplarisch, die weiteren Messungen mit dem jeweils eingestellten Peakstrom liegen im Anhang vor.



**Abbildung 34:** Ratenverlauf von Einspritzventil II mit 8 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung

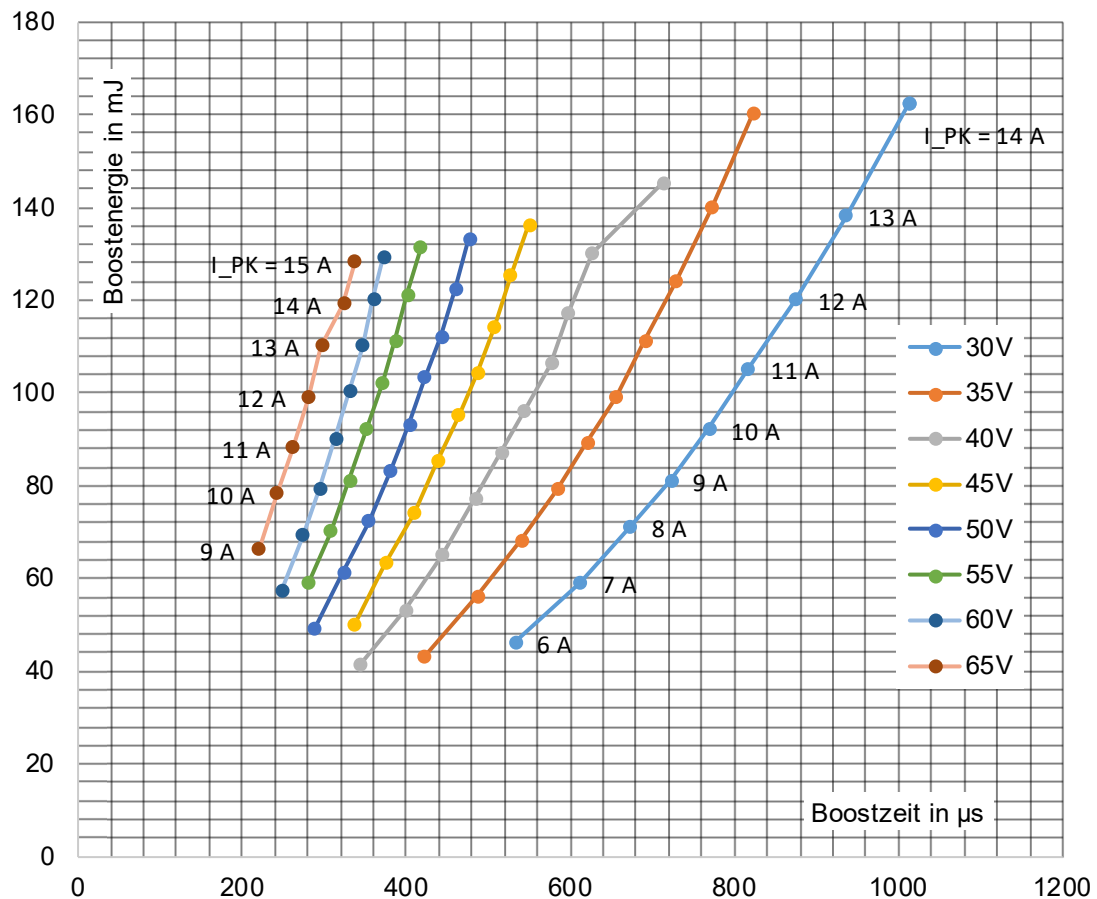
Zunächst wird der Zusammenhang der angelegten Boostspannung und des jeweiligen Peakstroms mit der sich ergebenden Boostzeit und der daraus berechneten Boostenergie dargestellt.

Analytisch erfasst werden mit dem Softwaretool MATLAB die mit den hydraulischen Messungen ermittelten relevanten Zeiten „Beginn hydraulisches Öffnen“ und „Ende hydraulisches Öffnen“.

Die gemessenen Boostzeiten sowie die zwei hydraulischen Öffnungszeiten sind als Diagramme in Abb. 36 bis Abb. 43 aufgetragen um einen Vergleich der zeitlichen Größenordnungen zu ermöglichen.

In Abb. 35 ist die untersuchte Boostspannung farbig dargestellt und die jeweils gemessene Boostzeit gegen die mit Gl. (2.2) errechnete Boostenergie aufgetragen. Jeder Spannungsast beginnt mit Ausnahme der Boostspannung von 30V mit dem energetisch höchsten Messpunkt bei 15 A Peakstrom und wandert in 1 A-Schritten zu kleineren Boostenergien. Die verwendete Einspritzelektronik liefert eine maximale Boostzeit von etwa 1000  $\mu\text{s}$ . Diese

wird bei der Boostspannung von 30 V und einem Peakstrom von 15 A überschritten. Daher erfolgt die Messung bei 30 V bis zu einem maximalen Peakstrom von 14 A.



**Abbildung 35:** Darstellung der Boostzeit über Boostenergie und Boostspannung

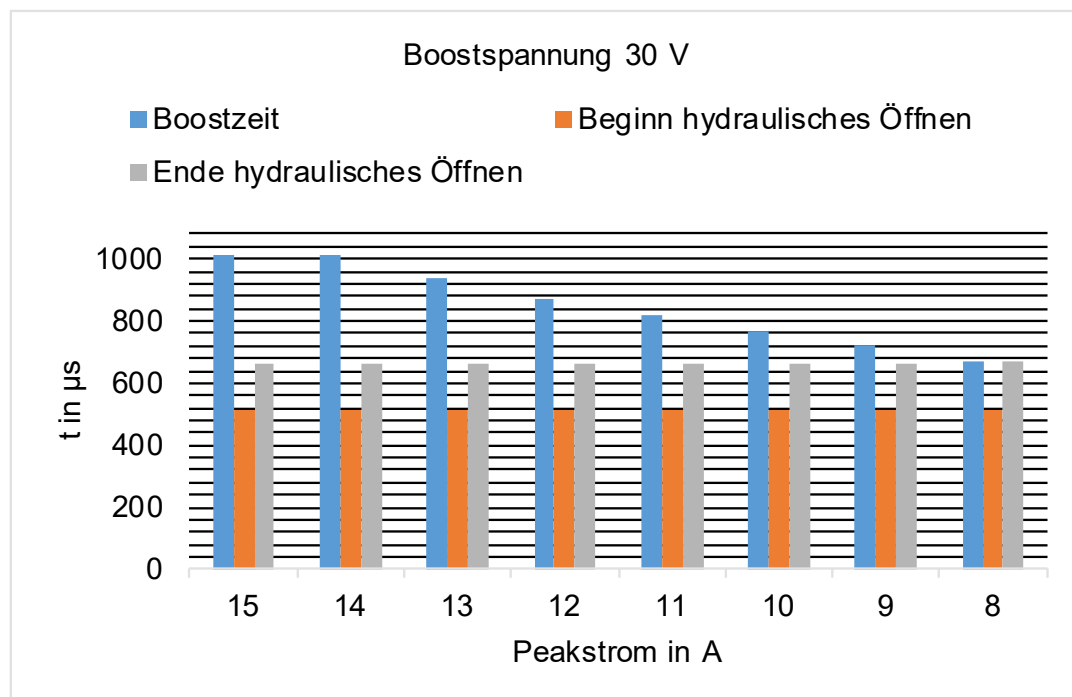
Der jeweils unterste Messpunkt stellt bei jeweils eingestellter Boostspannung den kleinsten einstellbaren Peakstrom dar, der noch ein sicheres hydraulisches Öffnen darstellt. Das Kriterium einer instabilen Öffnung liegt dann vor, wenn im jeweiligen Ratenverlauf der maximal statische Durchfluss nicht erreicht wird. Erkennbar ist dies an einer scheinbaren mittleren statischen Rate, welche einen Hinweis für ein nicht hydraulisches Öffnen bei einem oder mehreren der fünfzehn gemittelten Einspritzpulse ist. Der rot hinterlegte Ratenverlauf im Anhang Abb. 77 ist hier ein Beispiel für dieses Verhalten. Ein komplettes Fehlen der Öffnung liegt vor, wenn die gemittelte Rate nur noch zeitlich einen sehr kleinen parabelförmigen bzw. ballistischen Verlauf zeigt. Ein Beispiel hierfür ist der rot oder orange hinterlegte Ratenverlauf in Abb. 34 dar. In diesem Fall ist der Anker noch in der

Lage, aufgrund seines Impulses und der Magnetkraft die Nadel kurzfristig zu bewegen, jedoch führt dies aufgrund des hydraulischen Gegendrucks sofort wieder zum hydraulischen Schließen.

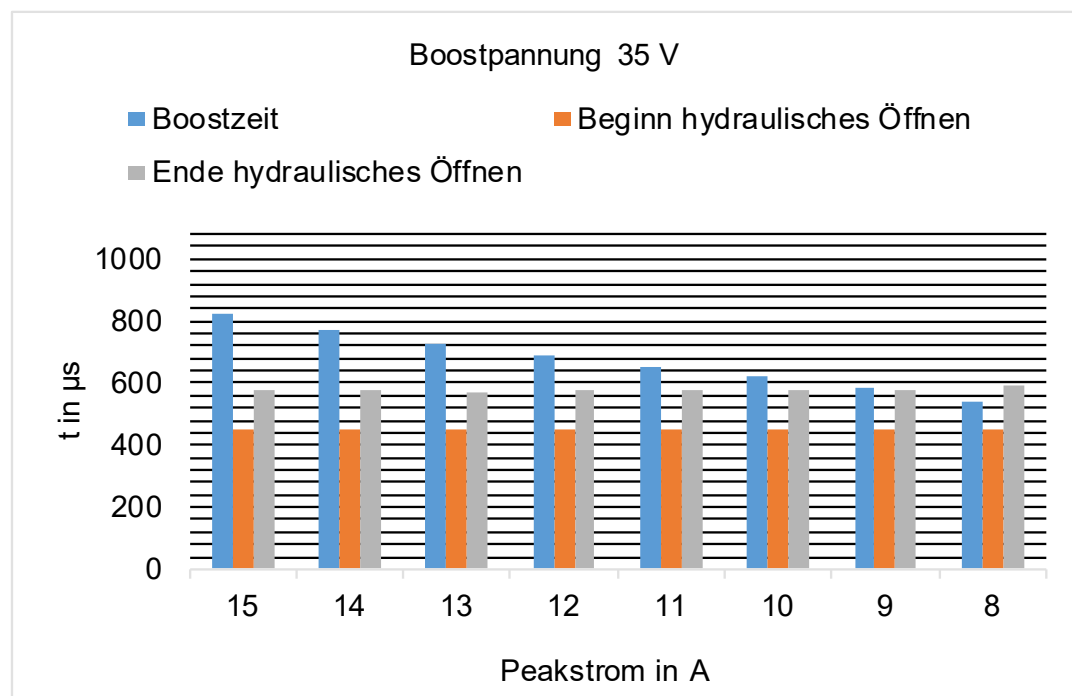
Es zeigt sich, dass wie auch nach Gl. (3.22) erkennbar bei steigendem Peakstrom die Boostzeiten und somit nach Gl. (2.3) auch die Boostenergien anwachsen. Tendenziell gibt es bei kleineren Boostspannungen ein stärkeres Anwachsen der Boostzeit. Da Fahrzeuguntersuchungen mit unterschiedlichen Einspritzventilen eine Grenze der üblich gemessenen Boostenergien von ca. 110 mJ aufweisen, lassen sich für einen sinnvollen elektrischen Arbeitsbereich dieses Einspritzventils maximale Peakstromgrenzen von 12 A für den untersuchten Boostspannungsbereich definieren.

Um Aufschlüsse über das hydraulische Verhalten des vorliegenden Einspritzventils mit den elektrischen Variationen zu gewinnen, werden über den Peakstrom  $I_{PK}$  und die Boostspannung  $U_{boost}$  die Boostzeit  $t_{boost}$  mit den Zeiten „Beginn hydraulisches Öffnen“ und „Ende hydraulisches Öffnen“ tabellarisch aufgetragen und miteinander verglichen. Einspritzventil II hat bei dem Systemdruck von 350 bar einen hydraulischen Durchfluss von 11 mg / ms. Das Kriterium der analytisch mit MATLAB ermittelten Zeit für „Beginn hydraulisches Öffnen“ liegt bei 0,5 mg / ms, für „Ende hydraulisches Öffnen“ bei 10 mg / ms.

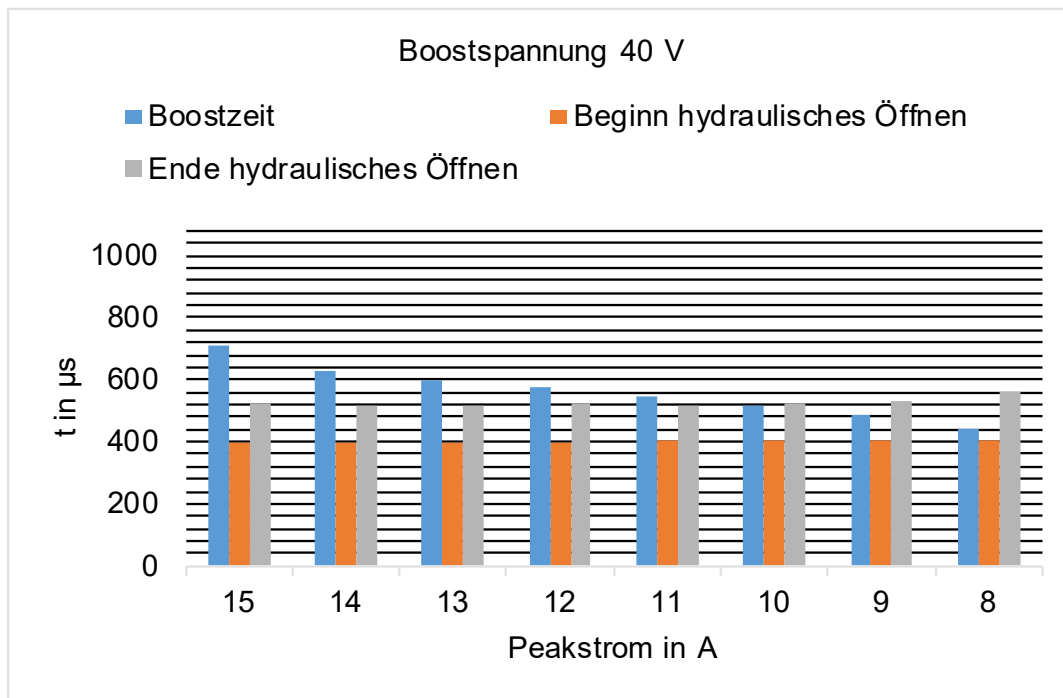
Die Diagramme in Abb. 36 bis Abb. 43 zeigen die Ergebnisse der Messungen mit der jeweils eingestellten Boostspannung, beginnend bei 30 V und einer schrittweisen Erhöhung von 5 V bis zu der Maximalspannung 65 V.



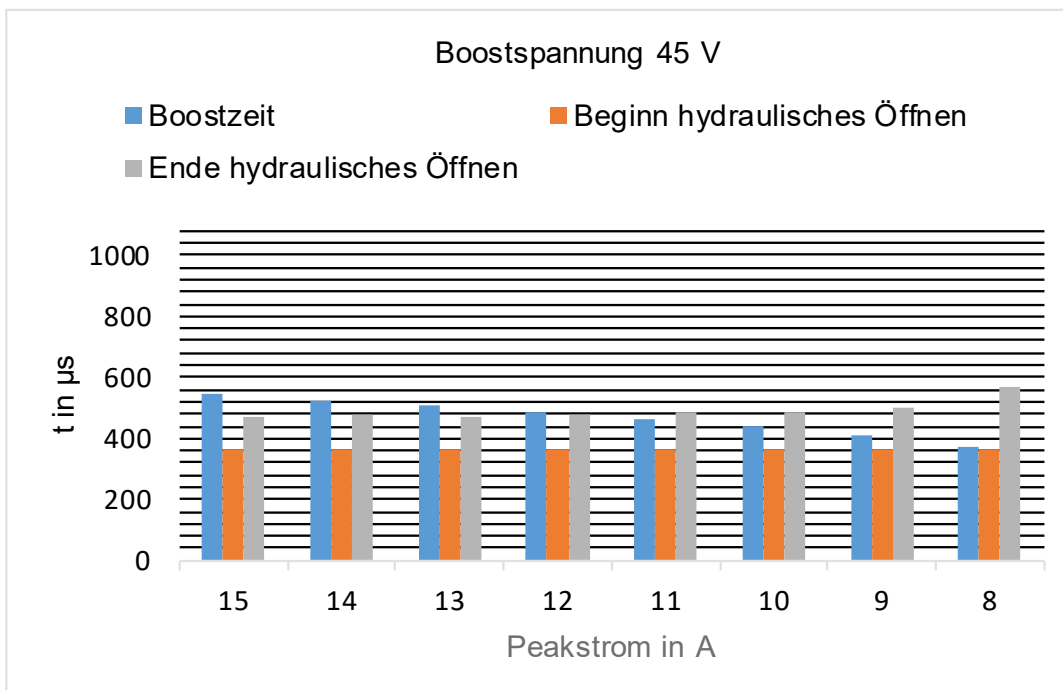
**Abbildung 36:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 30 V Boostspannung



**Abbildung 37:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 35 V Boostspannung

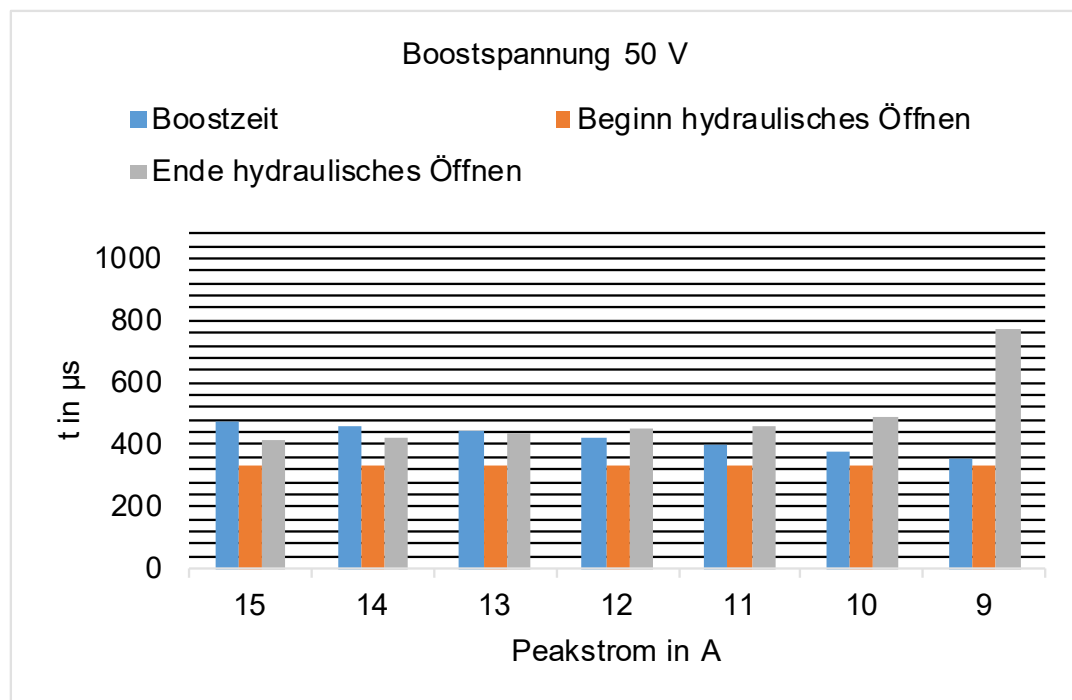


**Abbildung 38:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 40 V Boostspannung

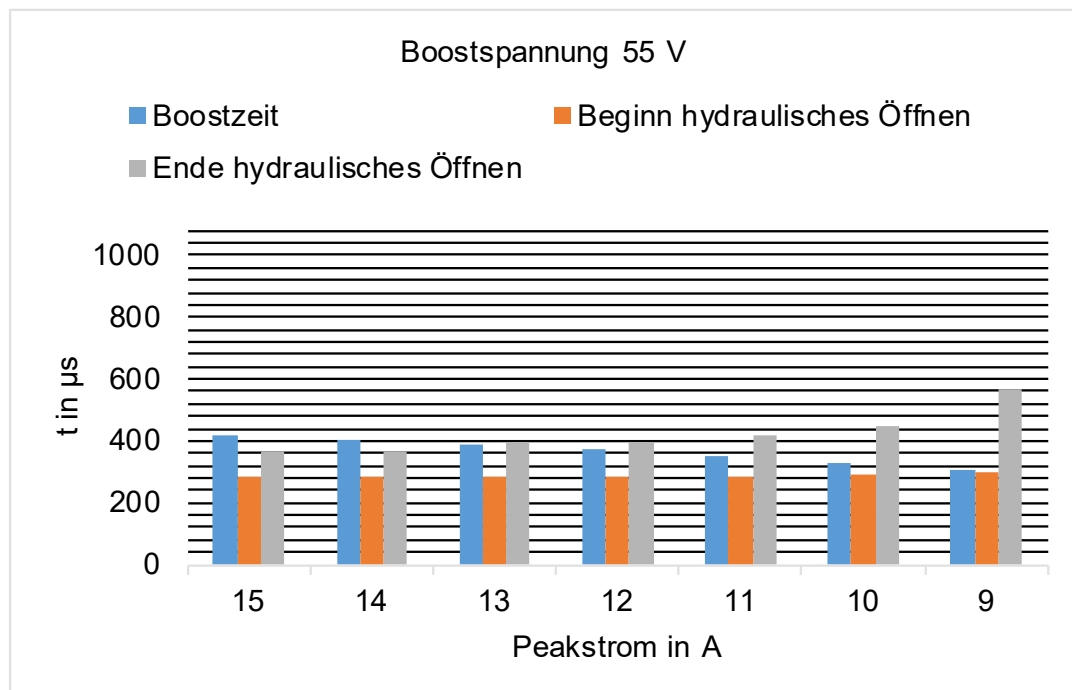


**Abbildung 39:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 45 V Boostspannung

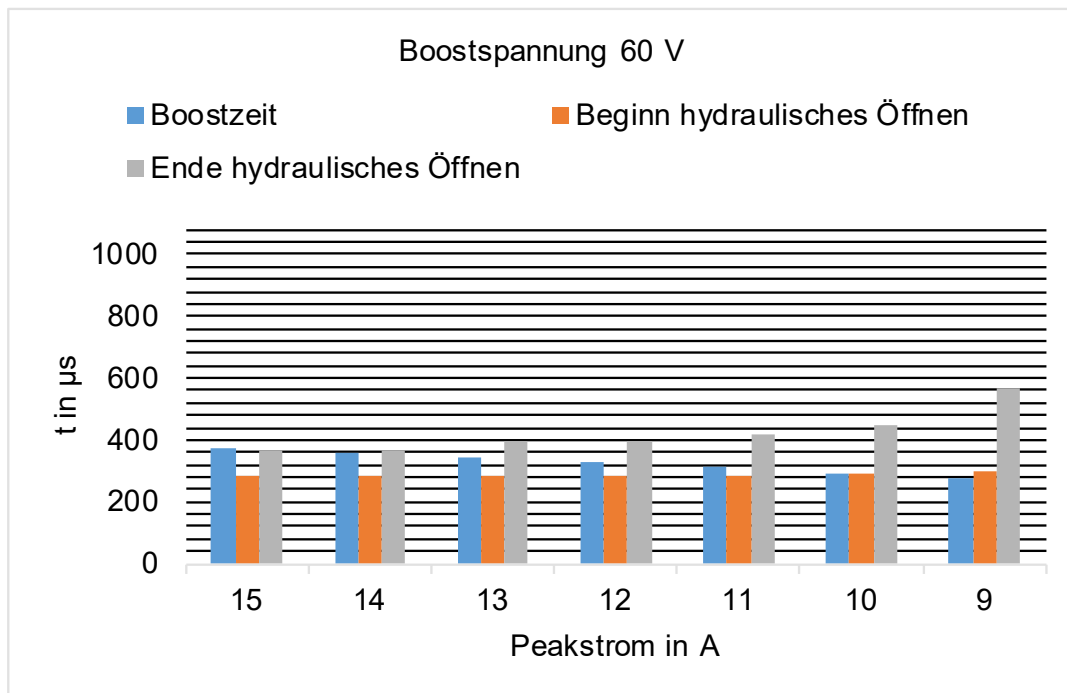




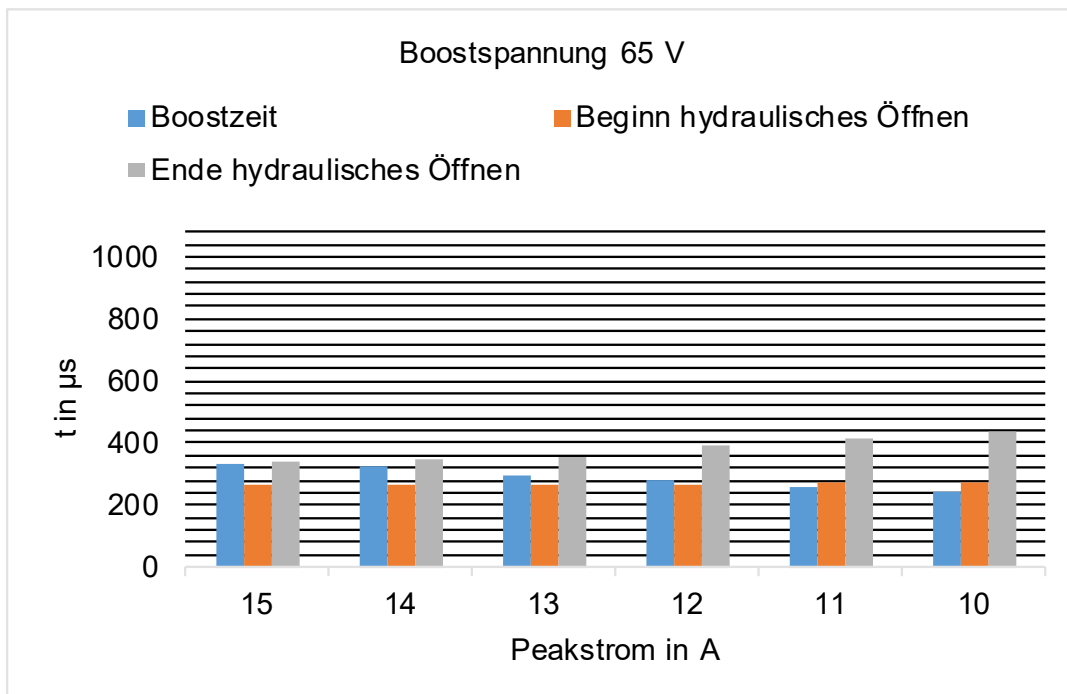
**Abbildung 40:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 50 V Boostspannung



**Abbildung 41:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 55 V Boostspannung



**Abbildung 42:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 60 V Boostspannung



**Abbildung 43:** Vergleich der Zeiten für Beginn und Ende hydraulisches Öffnen sowie der Boostzeit bei 65 V Boostspannung

Die hydraulische Öffnung zeigt für Boostspannungen im Bereich von 30 V bis 45 V auch bei einem kleinen Peakstrom von 8 A ein stabiles Öffnen, da sich die Boostzeit hier im Bereich zwischen der Zeit „Beginn hydraulisches Öffnen“ und „Ende hydraulisches Öffnen“ bewegt. Der Anker wird mindestens bis zum hydraulischen Öffnungspunkt mit noch ansteigender Magnetkraft getrieben. Der durch den Ankerfreiweg erhaltene mechanische Impuls und der durch den hydraulischen Öffnungsvorgang sich weiter verkleinernde Luftspalt ermöglichen auch bei zeitlichem Verlassen der Boostphase ein sicheres Erreichen der Position des statischen hydraulischen Durchflusses.

Allgemein führt eine höhere Boostspannung zu einer kürzeren Zeit „Beginn hydraulisches Öffnen“, weil der Anker stärker beschleunigt wird. Die Boostphase wird beendet, wenn der Peakstrom erreicht ist. Da bei einem fest vorgegebenen Peakstrom und einer höheren Boostspannung mit Gl. (3.22) dieser Peakstrom früher erreicht wird, wird auch die Boostphase früher beendet.

Auch bei kleinen Peakströmen beginnt der Anker beschleunigt die hydraulische Öffnung. Der magnetkrafttreibende Booststrom wird jedoch während der Öffnungsphase zu früh abgeschaltet. Der Spulenstrom verliert so stark an Wert, dass der Punkt „Ende hydraulisches Öffnen“ nicht erreicht werden kann. Die Öffnung wird instabil und der Anker fällt, getrieben durch die Schließfederkraft und durch die hydraulische Kraft, in die hydraulische Schließposition zurück.

Nimmt man als Entscheidungskriterium neben dem maximalen Peakstrom von 12 A einen Magnetkraftanstieg bis zum Ende der Öffnungsphase, so führt dies zu einer Auslegung der Boostspannung auf 45 V.

Da ein Einspritzventil mit Ankerfreiweg sein Öffnungsverhalten unter anderem auch aus seinem mechanischen Impuls bezieht und die Magnetkraftcharakteristik bei kleiner werdendem Luftspalt eine zusätzliche Erhöhung erfährt, muss dieses Kriterium nicht zwingend vorausgesetzt werden.

## 5.4 Differenzpulsverfahren

In den Offenlegungsschriften von Denk [Den15a], [Den13b] und [Den14a] werden Synchronisierungsverfahren beschrieben, bei denen zwei zeitlich nacheinander aufgezeichnete Stromprofile des gleichen Einspritzventils miteinander subtrahiert werden, um daraus unter anderem hydraulische Öffnungsinformationen des Einspritzventils zu gewinnen.

Dem Verfahren liegt die Idee zugrunde, dass zwei elektrisch „ähnliche“ Stromprofile leicht unterschiedliche Öffnungszeiten besitzen. Der Stromprofilunterschied ist in diesem Fall eine geringe Variation im Peakstrom im Bereich von 0,3 A bis 0,5 A. Der geringe Unterschied im Maximalstrom und somit auch in der maximalen Magnetkraft führt zu einem zeitlichen Verschieben des Öffnungsvorgangs des Einspritzventils.

Mit Hilfe eines geeigneten mathematischen Verfahrens subtrahiert man die beiden Stromverläufe derart, dass die zeitliche Zuordnung der beiden Ströme das Ende der Boostphase darstellt. Dies stimmt mit dem Moment überein, bei dem der maximale Peakstrom erreicht wird. Die relativen Extremwerte im Differenzstrom werden mit den hydraulischen Öffnungspunkten verglichen und im Hinblick auf einen Zusammenhang untersucht.

Das Verfahren gemäß Denk [Den15a] nutzt die Peakstromvariation in einem großen Bereich aus, um zusätzliche Merkmale des untersuchten Einspritzventils, wie beispielsweise sein Sättigungsverhalten, zu analysieren.

Die Offenlegungsschrift von Denk [Den13b] bezieht sich auf Standardstromprofile mit einer geringen Variation des Peakstroms.

In der Patentschrift von Denk [Den14a] enthält das zum Vergleich herangezogene „ähnliche“ Stromprofil keine Bewegungsinformation. Dieses Stromprofil wird durch Hinzufügen einer Boostphase in einem Zeitbereich erreicht, bei der das Einspritzventil bereits hydraulisch offen ist und somit keine Bewegungsvorgänge im Einspritzventil mehr auslösen kann.

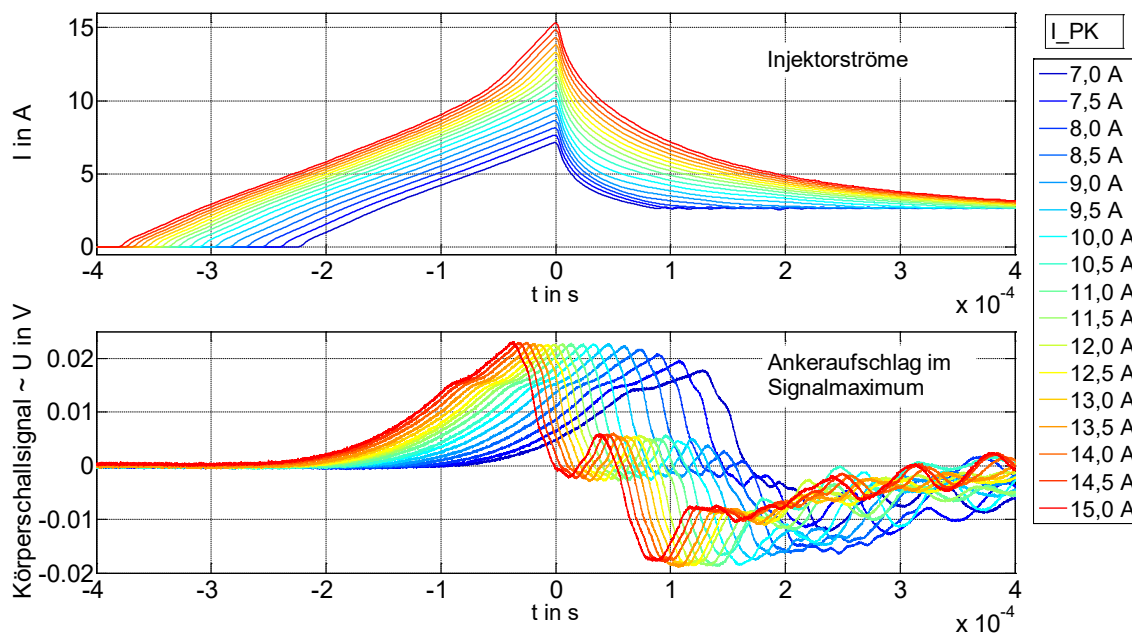
Das untersuchte Einspritzventil ist das Einspritzventil mit Ankerfreiweg III. Er wird gemäß Abb. 28 trocken am Testplatz betrieben. Mit Hilfe des an dem hydraulischen Kraftstoffanschluss in Abb. 29 befestigten Sensors wird das Körperschallsignal zeitlich aufgenommen.

Die weiteren Aufzeichnungsgrößen sind Spulenspannung und Spulenstrom. Das Triggerereignis ist die abfallende Boost-Flanke der Spulenspannung bei 60 V. Die Messungen erfolgen im Einzelaufnahmebetrieb. Der Peakstrom wird im Bereich von 7,0 A bis 11,5 A nach jeder Aufzeichnung schrittweise um 0,5 A erhöht.

Das vom Beschleunigungssensor erfasste Körperschallsignal besitzt Extremwerte in der Signalamplitude. Das Maximum im Körperschallsignal ist dem Ereignis zuzuordnen, bei dem der Anker und die geführte Nadel magnetkraftgetrieben das Joch erreichen und an diesem Punkt das Einspritzventil einen Rückstoß erfährt.

Ein Vergleich in Abb. 44 zeigt mit steigendem Peakstrom ein zeitliches Bewegen des Aufschlags aus der Phase Freilauf-gegen-Masse heraus in die Boostphase. Elektrisch betrachtet wandert das Aufschlagsereignis von der Phase Freilauf-gegen-Masse zunächst in den immer höher werdenden Freilaufstrom, bis schließlich der Peakstrom erreicht wird.

Die Amplitude des Beschleunigungssensorsignals bewegt sich vom maximalen Peakstrom 15 A bis 10 A auf etwa gleichem Niveau. Bei weiterem Verkleinern des Peakstroms ist erkennbar, dass sich ab etwa 10 A die Aufschlagssignalamplitude verringert. Ab diesem Stromniveau nimmt zudem auch bei weiterer Reduzierung des Peakstroms der zeitliche Abstand der Maxima der Signalamplitude zu. Dieses Signalverhalten liegt vor, wenn der Anker mit einer geringeren Geschwindigkeit das Ankerjoch erreicht.

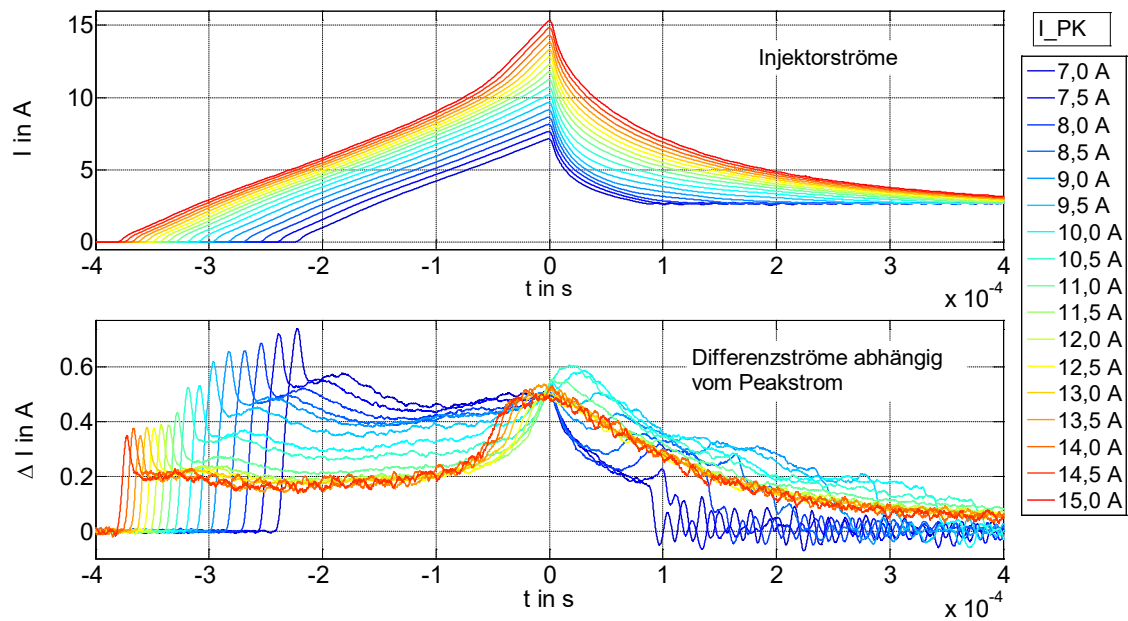


**Abbildung 44:** Messungen mit Einspritzventil III, Aufzeichnung der Spulenströme und der Körperschallsensorsignale in Abhängigkeit des Peakstroms

Die Stromdifferenzanalyse mit den unterschiedlichen Peakströmen in Abb. 45 zeigt am zeitlichen Triggerpunkt einen Wert von etwa 0,5 A. Dieser Wert wird durch die schrittweise Veränderung des eingestellten Peakstroms von 0,5 A hervorgerufen. Schwankungen sind hier auf Abschaltunterschiede der Endstufe zurückzuführen, da bei definiert gleicher Reaktionszeit des Abschaltvorgangs der Elektronik durch die unterschiedlichen Stromgradienten die Abschalthöhe variiert.

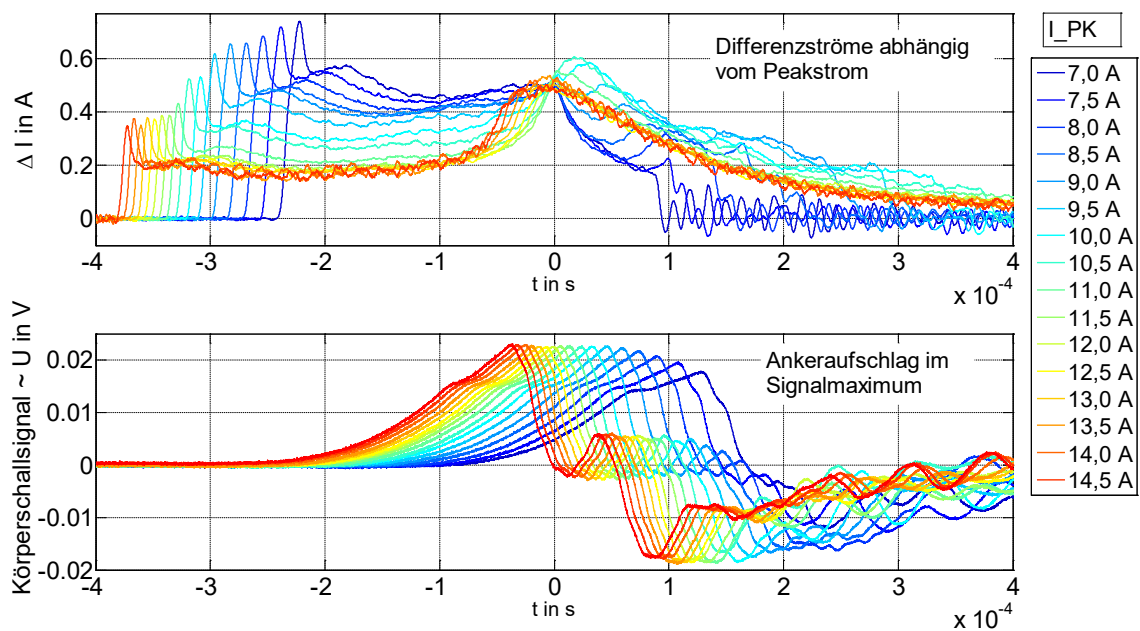
Der Vergleich der unterschiedlichen Peakströme und der Differenzströme in Abb. 45 zeigt, dass sich bei steigendem Peakstrom ab etwa 12 A im zeitlichen Bereich der Boostphase ein magnetisches Sättigungsverhalten im Einspritzventil ausbildet. Die Differenzströme erreichen hier ein konstant gleiches Niveau.

In der Phase Freilauf-gegen-Masse bilden sich Maximal- und Minimalwerte im Differenzstrom. Unterhalb von einem Peakstrom von 8 A wird der Differenzstrom nicht mehr auswertbar, da etwa 100  $\mu$ s nach dem Ende der Boostphase der Freilaufstrom hier das Niveau der batteriegeordneten Haltephase von 3 A erreicht hat.



**Abbildung 45:** Messungen mit Einspritzventil III, Aufzeichnung der Spulenströme und der Spulendifferenzströme in Abhängigkeit des Peakstroms

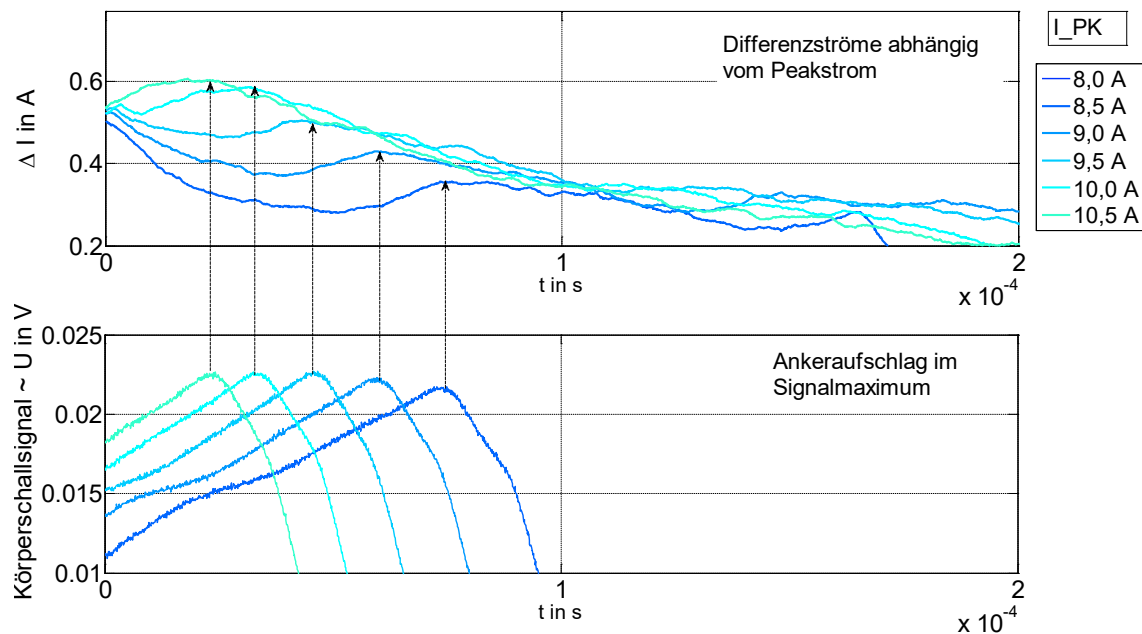
Um einen Zusammenhang dieser relativen Extremwerte mit dem Ankeraufschlagereignis zu erhalten, werden in Abb. 46 die ermittelten Differenzströme mit den Körperschallsignalen aus Abb. 44 verglichen.



**Abbildung 46:** Messungen mit Einspritzventil III, Aufzeichnung der Spulendifferenzströme und der Körperschallsignale in Abhängigkeit des Peakstroms

In Abb. 46 erscheinen im Bereich nach der Boostphase im Differenzstrom Maxima, die mit den Maxima des Körperschallsignals korrelieren.

Mit dem Ergebnis des Abschnitts 5.3 erfolgt zur Optimierung der benötigten Boostenergie eine Einschränkung der verwendeten Peakstromprofile. Da es sich in der Untersuchung um ein Einspritzventil mit Ankerfreiweg handelt, kann das Ende einer stabilen hydraulischen Öffnungsphase in den Bereich nach der Boostphase gelegt werden. Diese Einschränkung des Ankeraufschlags auf den zeitlichen Bereich nach den Peakstrom in die Phase Freilauf-gegen-Masse führt in der Abb. 47 zur Betrachtung des Wertebereichs von Peakströmen zwischen 8 A und 10,5 A.



**Abbildung 47:** Messungen mit Einspritzventil III, Extrema Ausbildung im Spulendifferenzstrom und im Körperschallsignal mit reduziertem Messbereich

In Abb. 47 ist deutlich der Zusammenhang zwischen dem Maximum des Körperschallsignals und dem Maximum des Differenzstroms erkennbar. Ist das Stromprofil des Einspritzventils so auslegbar, dass das Ende einer hydraulisch stabilen Öffnung nach der Boostphase im Bereich Freilauf-gegen-Masse erfolgen kann, so ist die Öffnung im Maximum des Differenzstroms erkennbar.

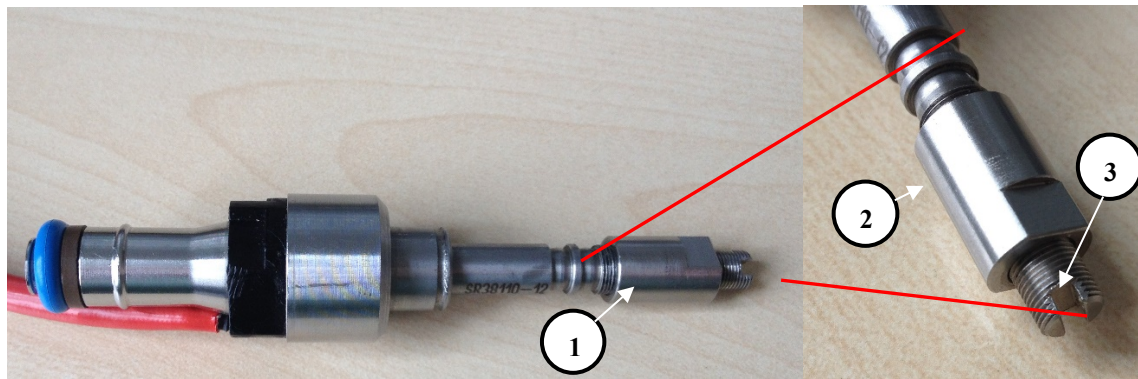


Das Differenzstromverfahren ermöglicht zusätzlich auch eine Untersuchung der effizienten Stromprofilauslegung hinsichtlich dem Sättigungsverhalten eines vorliegenden beliebigen Einspritzventils.

## 5.5 Einspritzventil mit variablem Hub

Die qualitative Analyse des Signalverhaltens in Spulenstrom und Spulenspannung wird bei einem Einspritzventil ohne Ankerfreiweg IV mit einer Nadelhubverstelleinheit untersucht. Zum Anfertigen dieser Verstelleinheit in Abb. 48 wird die Abdeckplatte des hydraulischen Nadelsitzes entfernt. Der dadurch entstandene zylindrische Restkörper (1) wird mit einem Feingewinde M8 x 0,5 versehen sowie eine Innengewindehülse (2) aufgeschraubt. Eine zusätzliche Schraube (3) ermöglicht durch definierte Drehung entsprechend der Feingewindesteigung, eine Abstandsänderung der innen anliegenden Nadel und des Ankers zum Ankerjoch. Konzeptbedingt wird die Kalibrationsfeder nach Abdrehen des Nadelsitzes entspannt und der Anker in diese Entspannungsposition mitgeführt.

Die Lage dieser Position kann aufgrund der unterschiedlichen Federvorspannungen nicht ermittelt werden, so dass sich ein großer, jedoch nicht genau definierter Luftspalt ergibt. Allerdings ist es durch ein Eindrehen des Feingewindes möglich, den Ankeranschlag, der fest mit der Nadel verbunden ist, bis zum Ankerjoch mit minimal möglichem Luftspalt zu führen. Dies ist im Versuch zu erkennen, wenn sich beim Eindrehen das zeitliche Stromprofil nicht mehr ändert. Hieraus wird die Referenzposition ermittelt, von der aus der relative Abstand durch Herausdrehen der Feingewindeschraube verändert wird.

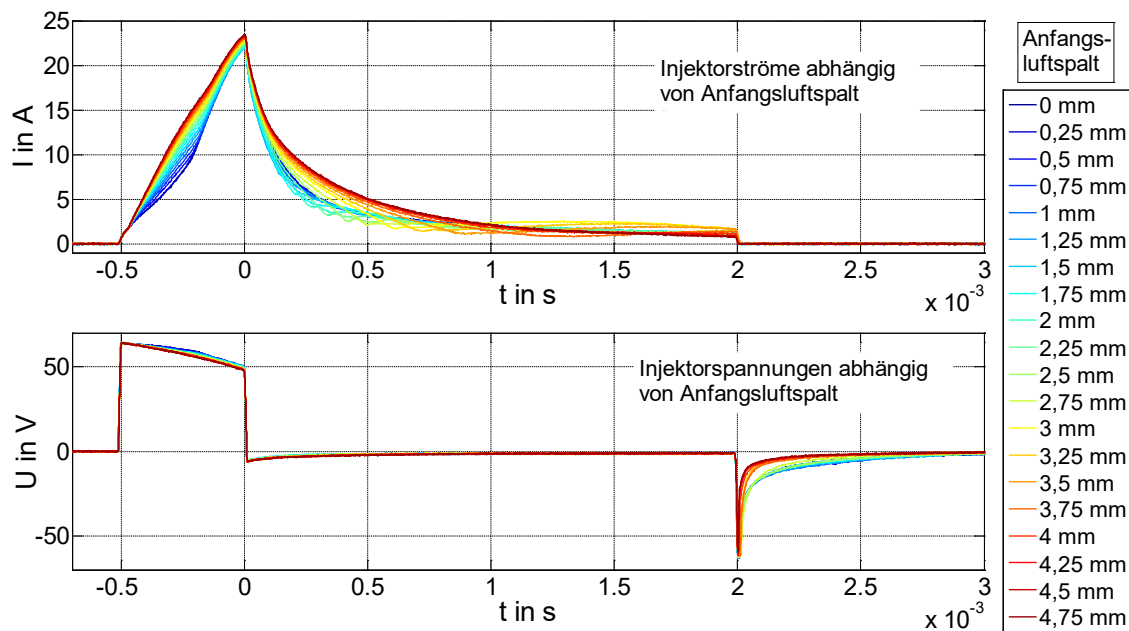


**Abbildung 48:** Einspritzventil IV ohne Ankerfreiweg mit Nadelverstelleinheit

Die Messung erfolgt im Labor unter Trockenbedingungen. Aufzeichnungsgrößen sind der Spulenstrom und die Spulenspannung. Der Trigger erfolgt auf die Spulenspannung und zeitlich auf das Ende der Boostphase. Der Sollwert des Peakstroms beträgt immer 24 A. Damit kann das Einspritzventil einen Strombereich erreichen, der ein Sättigungsverhalten bewirkt, um mögliche neue Erkenntnisse aus diesem Bereich zu erhalten. Nach der Boostphase wird in die Phase Freilauf-gegen-Masse umgeschaltet. In dieser Phase verbleibt das Einspritzventil bis zum Ende der konstanten Einspritzzeit von 2,5 ms.

Messbeginn erfolgt bei minimalem Luftspalt. Nach jeder Messung erfolgt eine neue Einstellung sowohl der Ankerposition als auch der Nadelposition durch jeweils eine halbe Linksumdrehung der Feingewindeschraube, was einer Änderung des Abstands von jeweils 250  $\mu\text{m}$  entspricht. Es erfolgen in Abb. 49 zwanzig Aufzeichnungen mit je einer Aufnahme pro Abstand. Die Veränderung im Gesamthub beträgt somit 4,75 mm.

Die Hubänderung erfolgt hier in einem Bereich des Luftspalts, der weit außerhalb des maximal normalen Arbeitsbereichs von etwa 100  $\mu\text{m}$  liegt. Es ist hiermit möglich, die Unterschiede im Spulenstrom, in der Spulenspannung und im Flussverlauf extremer darzustellen und damit das Grundverhalten qualitativ besser beschreiben zu können. Die Darstellung erfolgt farbig von blau mit minimalen Luftspalt bis rot mit maximalen Luftspalt.



**Abbildung 49:** Strom- und Spannungsverlauf in Abhängig vom Anfangsluftspalt

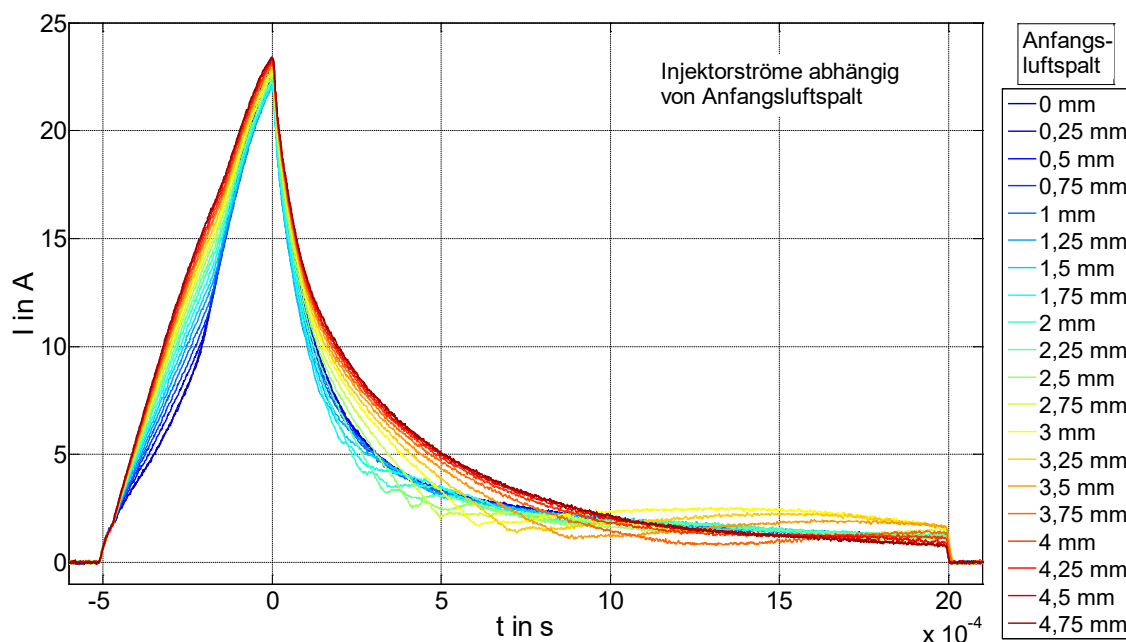
Die Untersuchung des Stromverlaufs in der Boostphase zeigt in Abb. 50 je nach Anfangsluftspalt ein unterschiedliches Krümmungsverhalten, das mit größerem Luftspalt einen steileren Verlauf aufweist. Gemäß Kallenbach [Kal12] ist dies durch den magnetischen Widerstand des Luftspalts begründet. Der bei gegebenen Spulenstrom sich ausbildende magnetische Fluss ist indirekt proportional zur Größe des magnetischen Luftspaltwiderstands, der sich bei Vergrößerung des Luftspalts erhöht. Ein kleinerer magnetischer Fluss führt nach Gl. (3.26) zu geringerer Gegeninduktionsanteilen und der Stromverlauf des Einspritzventils wird mehr durch den Ohmschen Spannungsabfall beeinflusst. Der gleiche Stromverlauf für alle Messungen zu Beginn der Boostphase bis etwa 2 A lässt sich nach Kallenbach [Kal12] durch einen parallel wirkenden dynamischen Wirbelstromwiderstand erklären. Sein Einfluss ist im Moment der Zuschaltung der Boostspannung am größten, da hier aufgrund der Energieerhaltung der Spulenstrom bei 0 A beginnen muss und die Gegeninduktion und somit auch die zeitliche Flussänderung ein Maximum hat.

Die Boostspannung weist durch den hohen Peakstrom einen starken Einbruch um 15 V auf. Die Ursache des Spannungsabfalls ist mit Gl. (2.3) die elektrische Energieentladung des Zwischenkreiskondensators, die dem Einspritzventil als Boostenergie zugeführt wird.

Dies erzeugt einen zusätzlichen Effekt im hohen Strombereich. Die Abnahme der Boostspannung führt nach Gl. (3.22) zu einem geringeren Grenzwert im Spulenstrom. Bei einem Ohmschen Widerstand des Einspritzventils im Bereich von  $1,5 \, \Omega$  ergibt sich eine Verminderung des Grenzwerts des Spulenstroms von etwa 43 A auf 33 A. Das rechtsgekrümmte Verhalten aller aufgezeichneten Spulenströme im oberen Peakstrombereich ist somit erklärbar.

Trotz des gleichen Sollwerts ist in Abb. 50 ein Unterschied im Abschaltwert des Peakstroms erkennbar, der nicht durch unterschiedliche Stromgradienten beim Abschaltvorgang hervorgerufen wird. Die weitere Analyse ergibt, dass bei allen Messungen die 24 A nicht erreicht werden, da das Konzept der eingesetzten Einspritzelektronik beim Erreichen der Boostzeit von  $500 \, \mu\text{s}$  die Boostphase beendet.

Somit liegt eine zeitliche Steuerung der Boostphase vor und der Vergleich der Ströme mit dem zeitlichen Bezug auf das Ende der Boostphase muss in einer anderen Weise interpretiert werden. Die Messung des kleinsten gemessenen Maximalwertes des Peakstroms ist nach Gl. (3.22) mit einer größeren elektromagnetischen Zeitkonstante verbunden. Somit ist bei gleichem Widerstand die Induktivität größer. Nach Kallenbach [Kal12] ist dies mit dem kleinsten Luftspalt verbunden.



**Abbildung 50:** Stromverlauf in Abhängigkeit vom Anfangsluftspalt

Zur Berechnung des magnetischen Flussverlaufs wird ein Ohmscher Widerstand von  $1,538 \Omega$  berücksichtigt. Dies ist der Wert, der mit MATLAB durch eine mehrmalige Berechnung des Flusses mit unterschiedlichen Widerstandsvorgaben ermittelt wird. Dazu wird in einem Bereich von  $1,3 \Omega$  bis  $1,6 \Omega$  mit einer Schrittweite von  $1 \text{ m}\Omega$  eine Schar von Flusskurven zunächst berechnet.

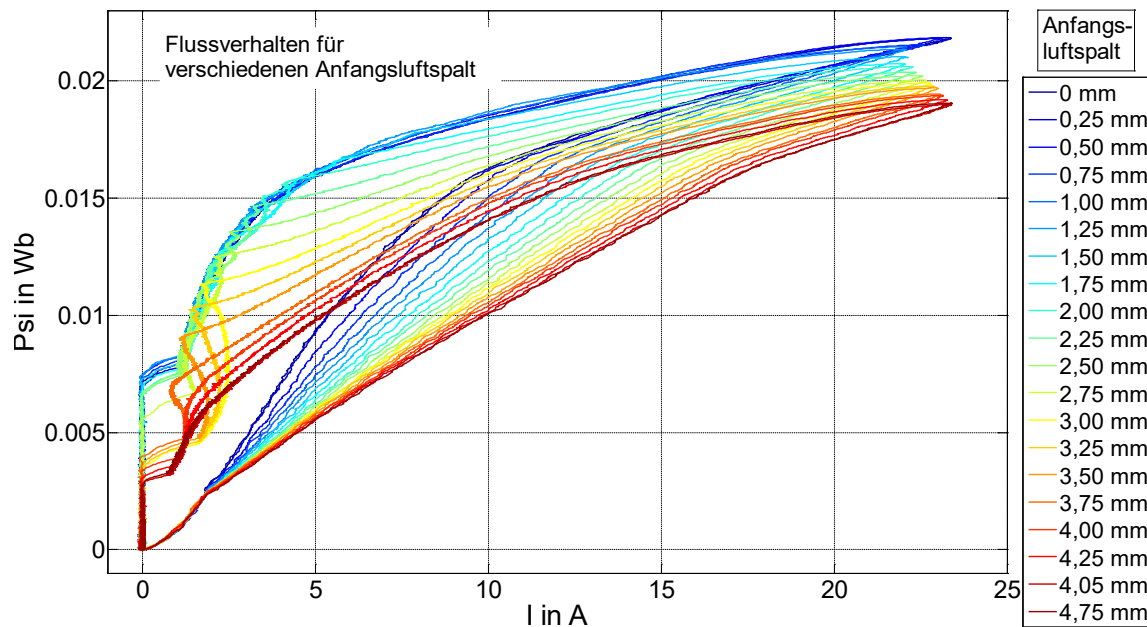
Das Entscheidungskriterium für den genutzten Widerstand erfolgt nach Abschnitt 4.2 mit dem magnetischen Fluss, der aus der berechneten Schar von Magnetflüssen am Ende der elektrischen Aufzeichnung einen Wert von etwa  $0 \text{ Vs}$  errechnet. Diese Flusskurve wird dann graphisch aufgetragen. Die Ermittlung der Flusskurven erfolgt nach diesem Prinzip in Abb. 51 mit allen eingestellten Luftspaltabständen. Hintergrund ist die physikalische Annahme aus dem Abschnitt 4.2, dass die gespeicherte magnetische Energie zeitlich betrachtet vor der Bestromung und am Ende der Bestromung nach dem Abbau der Restspulenspannung gleich sein muss. Dieses Berechnungsverfahren basiert auf zeitlich veränderlichen Flussverteilungen. Remanenzmagnetisierungen sind mit diesem Verfahren nicht erkennbar.

Da das Einspritzventil mit dem jeweils gleichen Stromprofil beaufschlagt wird, die thermische Umsetzung und die daraus resultierende Widerstandsänderung gleich ist sowie die Analyse des Einflusses des variablen Luftspalts im Flussbereich relativ bewertet wird, ist dieser Widerstandswert eine akzeptable Berechnungsgröße.

Der Anfangsluftspalt hat deutlichen Einfluss in Abb. 51 auf das Steigungsverhalten im Flussbereich und auf die Höhe der erreichbaren Flusswerte, was die Offenlegungsschrift von Denk [Den12a] erläutert. Hier wird bei einem Magnetkreis mit Luftspalt die Veränderung in der B-H-Kennlinie dargestellt, welche durch eine Luftspaltvergrößerung zu einer Abflachung, Scherung und Linearisierung der B-H-Kennlinie führt. In Abb. 51 ist ein unterschiedlicher Maximalstrom bei unterschiedlichem Maximalfluss erkennbar. Dies lässt sich zwei Luftspaltkonfigurationen zuordnen.

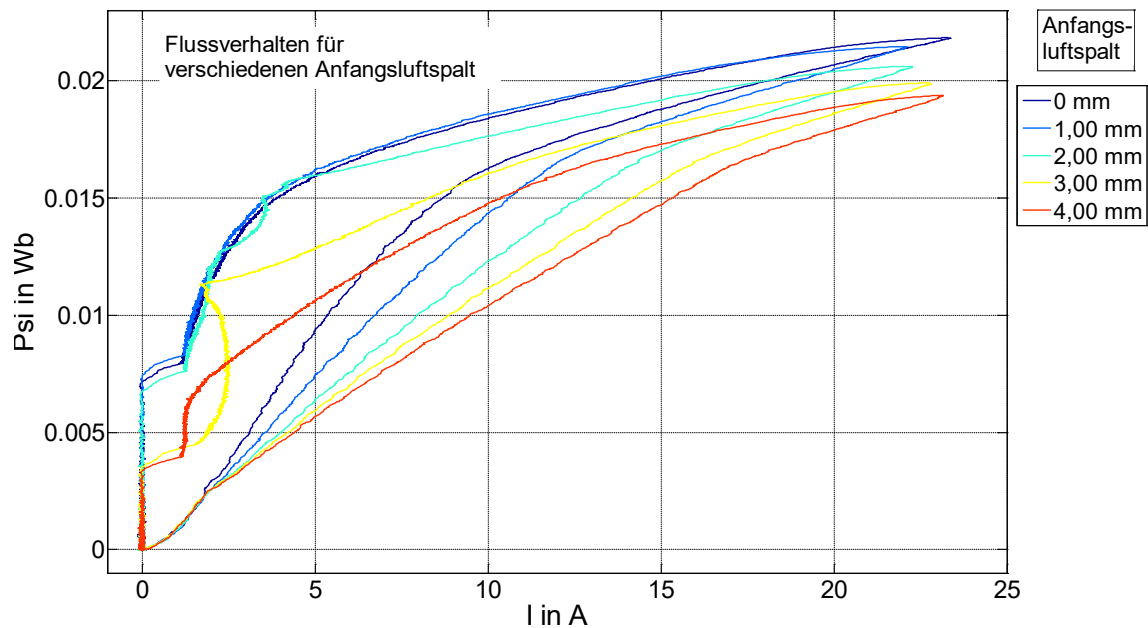
Im Bereich des Anfangsluftspalts von  $4,75 \text{ mm}$  bis  $1 \text{ mm}$  hat der Anker im Moment des Peakstroms das Ankerjoch noch nicht erreicht. Erkennbar ist dies an der kontinuierlichen Erhöhung des Maximalflusses mit Verkleinerung des Anfangsluftspaltes und dem durch die zeitgesteuerte Boostphase sich reduzierenden Peakstrom.

Ab dem Anfangsluftspalt von 1 mm hat zum Zeitpunkt des Peakstroms der Anker das Ankerjoch bereits erreicht. Da aufgrund der Versuchsanordnung die Verifikation mit Hilfe eines Körperschallsensors nicht durchführbar ist, wird hier auf den Abschnitt 5.7 verwiesen, bei dem der Zusammenhang zwischen dem Ankeraufschlag im Moment des Erreichens des Peakstroms und dem magnetischen Flussverhalten hinreichend bestätigt wird. Mit der weiteren Reduzierung des Anfangsluftspalts bis auf 0 mm erhöht sich der maximale Peakstrom und wandert im Flussbereich während der Boostphase auf einer sich vereinigenden Flusslinie.



**Abbildung 51:** Phasenraum in Abhängigkeit vom Anfangsluftspalt

Der Aufschlagbereich bei einem Anfangsluftspalt größer als 1 mm befindet sich elektrisch betrachtet in der Phase Freilauf-gegen-Masse. Um die Signalausprägungen in diesem Bereich zu charakterisieren, werden die Flussverläufe exemplarisch in Abb. 52 für den Luftspaltbereich von 0 mm bis 4 mm in Schritten von 1 mm dargestellt.



**Abbildung 52:** Phasenraum mit Anfangsluftspalt 0 mm bis 4 mm in Schritten von 1 mm

Der Anfangsluftspalt in Abb. 52 steht in direktem Zusammenhang mit dem Flussverlauf. Mit kleinerem Luftspalt steigt der Fluss in der Boostphase an. Bei dem Abstand 1,00 mm erreicht der Anker das Ankergegenstück, bevor der Peakstrom erreicht ist. Die Flusslinien für den Luftspalt 0 mm und 1,00 mm verbinden sich noch vor dem Peakstrom und verlaufen gemeinsam in die Phase Freilauf-gegen-Masse. Der Flussabfall in der Phase Freilauf-gegen-Masse ist umso steiler, je größer der Anfangsluftspalt ist. Der Ankeraufschlag ereignet sich beim Anfangsluftspalt von 2,00 mm bei 3 A und 15 mWb und beim Anfangsluftspalt von 3,00 mm bei 2 A und 12 mWb. Der Gradient der Flussänderung im Aufschlagsereignis nimmt mit größeren Anfangsluftspalt und mit kleinerem Freilaufstrom zu.

Eine große Änderung des Flussgradienten führt nach Gl. (3.28) und Gl. (3.29) zu einer großen Induktionsveränderung, was deutlich im zeitlichen Stromverlauf erkennbar ist. Mit diesem Ergebnis kann bei der Auslegung des Stromprofils im Öffnungsbereich Einfluss auf die Ausprägung der Sensorinformation im Spulenstrom genommen werden.

## 5.6 Freilauf Masse oder Batterie

Ziel der Untersuchung ist es, eine energetische Analyse im elektrischen und magnetischen Bereich durchzuführen, bei der dem Einspritzventil nach einer Boostphase mit unterschiedlicher Höhe des Peakstroms zeitlich zwei unterschiedliche elektrische Zustandsphasen angelagert werden.

Das Experiment erfolgt mit dem mechanisch in Nulllage blockierten Einspritzventil mit Ankerfreiweg V im Labor. Spulenstrom- und Spulenspannungsverlauf werden simultan aufgezeichnet und daraus unter Annahme eines konstanten Widerstands der verkettete magnetische Fluss berechnet. Die Variation des Peakstroms liegt im Bereich von 2 A bis 12 A Peakstrom mit einer Schrittweite von 1 A, Trigger ist der Beginn der Boostphase.

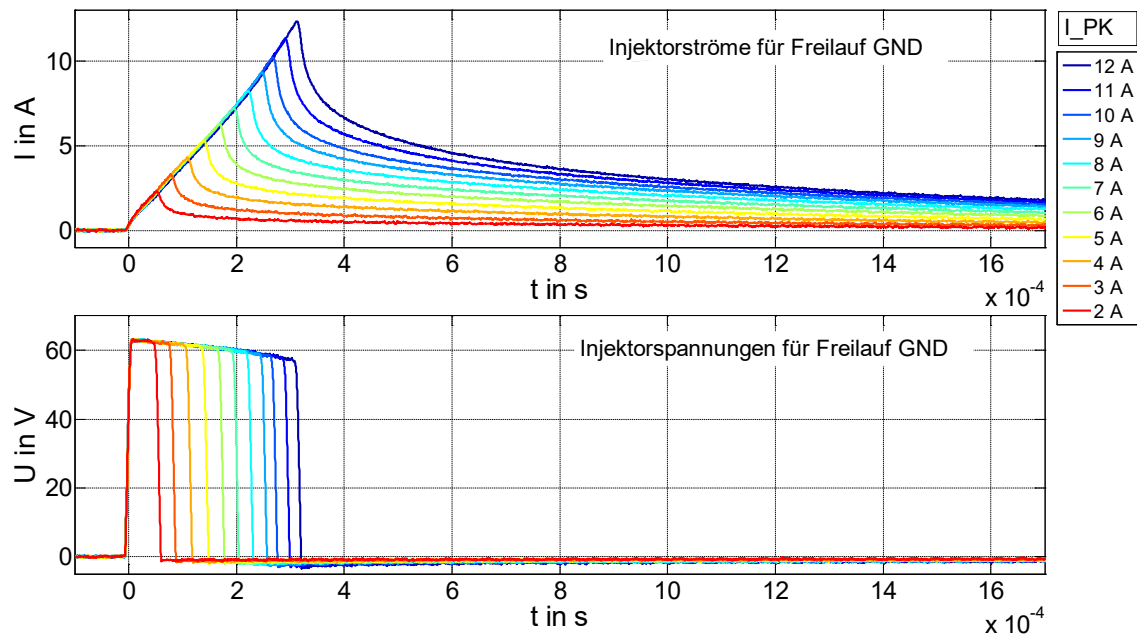
In der Abb. 53 ist das Verhalten der Spulenspannung und des Spulenstroms mit der Anschlussbedingung Übergang von Boostphase in die Phase Freilauf-gegen-Masse über Variation des Peakstroms dargestellt.

Die Messungen erfolgen schrittweise von niedrigerem zu höherem Peakstrom. Jeder Peakstrom wird mehrfach aufgezeichnet, so dass sich aufgrund der Erwärmung des Einspritzventils eine Widerstandsänderung ergibt. Diese ist in Abb. 53 als Steigungsänderung im Spulenstrom erkennbar.

Der Spulenstrom, der durch den Betrieb mit Freilauf-gegen-Masse fließt, wird mit einer passiven Zustandsspannung, die primär von der begrenzenden Sperrspannung der Freilaufdiode in Abb. 19 herrührt, im Freilaufstrompfad getrieben. Diese Spannung liefert einen annähernd konstanten Beitrag in der Differenzspannung des Einspritzventils.

Die Ohmschen Anteile des Freilaufpfads erzeugen zusätzlich einen stromstärkeabhängigen Spannungsabfall.



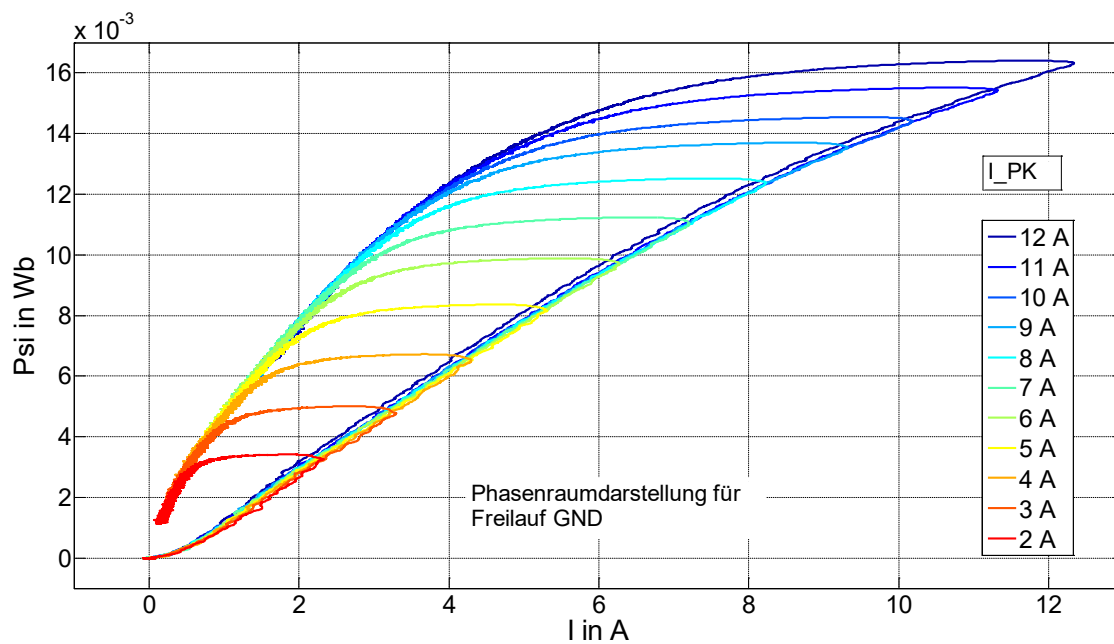


**Abbildung 53:** Freilauf-gegen-Masse im Zeitbereich mit unterschiedlichen Peakströmen

Die Flussberechnung erfolgt bei der Analyse mit der Vorgabe eines Widerstandes von  $1,47 \Omega$ . Dieser Wert wird gewählt, da sich hier nach dem Abschnitt 4.2 ein physikalisch sinnvoller Übergang hinsichtlich Steigung, Krümmungsverhalten und Übergangsverhalten in die nachfolgenden Freilaufphasen ergibt.

Eine Schleifenintegration mit dem Endwert des Flusses bei 0 Vs kann hier nicht angewendet werden, da die Messungen am Aufzeichnungsende in den Freilaufphasen enden und das Einspritzventil somit noch Magnetisierungsenergie besitzt.

Für den Fall Freilauf-gegen-Masse ergibt sich in Abb. 54 die Phasenraumdarstellung für unterschiedliche Peakströme. Die Erwärmung des Einspritzventils wurde in der Flussberechnung nicht berücksichtigt, zeigt sich jedoch im nicht gleichen Verlauf des Flusses während der Boostphase über den Spulenstrom mit steigendem Peakstrom.



**Abbildung 54:** Freilauf-gegen-Masse im Phasenraum mit unterschiedlichen Peakströmen

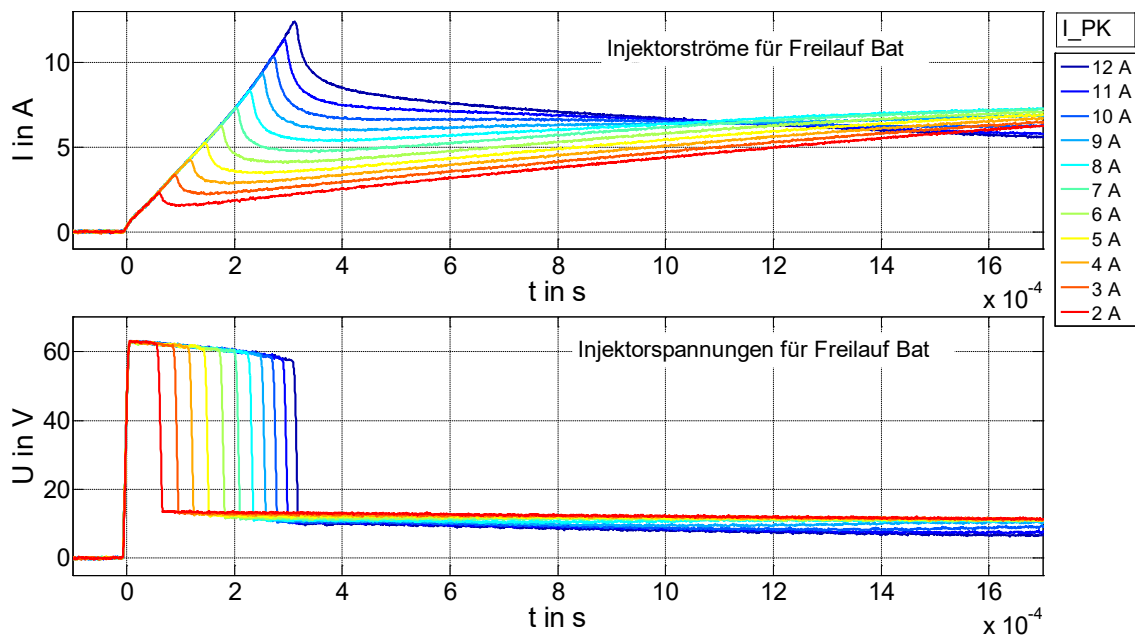
In Abb. 55 ist das Verhalten der Spulenspannung und des Spulenstroms mit der Anschlussbedingung Übergang von Boostphase in die Phase Freilauf-gegen-Batterie über Variation des Peakstroms dargestellt.

Die Messungen erfolgen schrittweise von niedrigerem zu höherem Peakstrom. Jeder Peakstrom wird einfach aufgezeichnet und zwischen den Messungen eine Wartezeit von mehreren Minuten eingehalten, um die Erwärmung des Einspritzventils und damit eine Widerstandsänderung zu minimalisieren.

Der Betrieb mit Freilauf-gegen-Batterie und nominaler Spulenspannung von 14 V weist in Abb. 55 einen zeitlich sehr unterschiedlichen Verlauf auf. Der Grund liegt in der genutzten Spannungsquelle. Je nach Belastung des Netzteils, dessen Leistungsfähigkeit und dem eingestellten Spannungssollwert ist der Verlauf unterschiedlich.

Je nach dem im Experiment eingestellten Peakstrom ist nach dem Umschalten in die Batteriephase im Freilaufstrom ein lokales Minimum zu erkennen. Grund ist der dynamische Flussaufbau während der Boostphase. Im Moment des Umschaltens von Boostspannung

auf Batteriespannung ist die durch die Boostphase hohe dynamische Flussänderung im Einspritzventil noch nicht abgeklungen.



**Abbildung 55:** Freilauf-gegen-Batterie im Zeitbereich mit unterschiedlichen Peakströmen

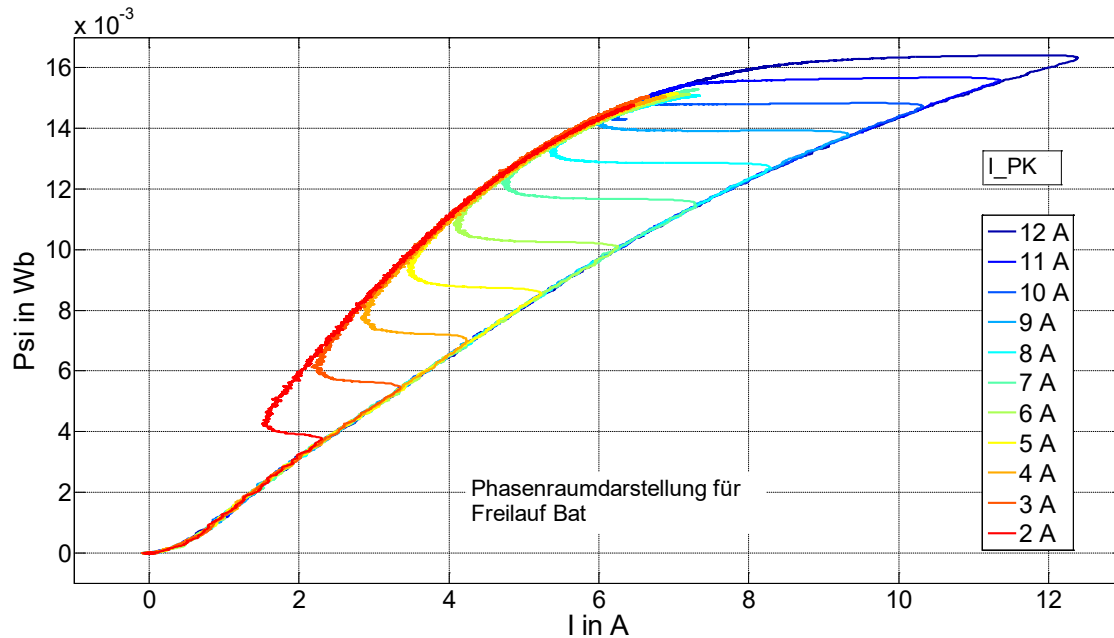
Die aktive Zustandsspannung ist in der Batteriephase etwa um den Faktor 10 kleiner als die Boostspannung.

Die sich einstellende Flussveränderung ist im Moment des Umschaltens das Resultat aus der Flussausprägung, die durch die starke Boosterregung hervorgerufen wurde und der sich mit der kleineren Batteriespannung und somit auch geringeren Erregung sich neu einstellenden Flussausprägung.

Dieser Vorgang äußert sich in einer Induktivitätsänderung des Einspritzventils, die den Stromverlauf maßgeblich beeinflusst.

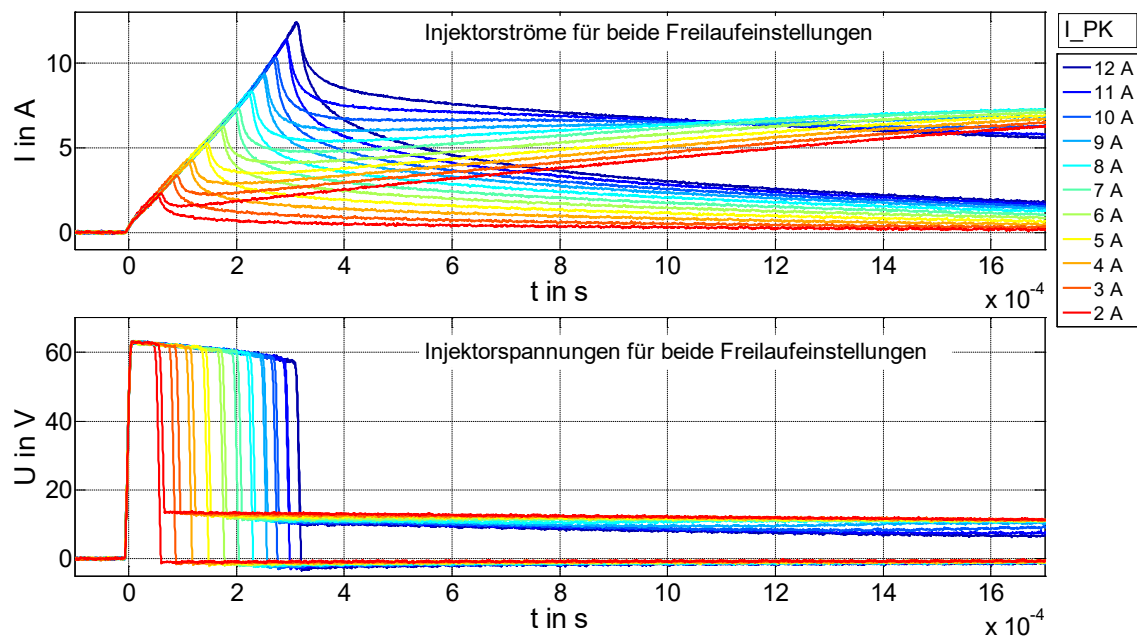
Im Phasenraum ist in der Boostphase in Abb. 56 eine stetige Flusszunahme zu erkennen. Der Übergang in die Phase Freilauf-gegen-Batterie ist zunächst durch einen annähernd konstanten Fluss bei unterschiedlich starkem Stromrückgang gekennzeichnet.

Nach diesem Stromrückgang erfolgt ein sich einstellender Flussverlauf, der je nach erreichbarem Maximalstrom in der Batteriephase abfallend oder ansteigend wirkt.



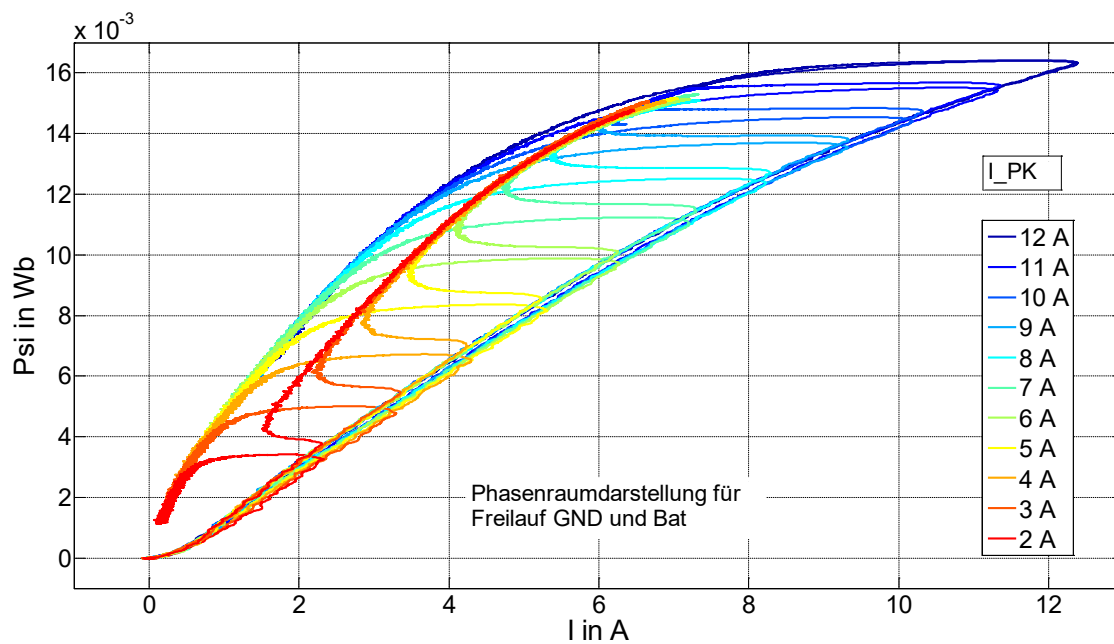
**Abbildung 56:** Freilauf-gegen-Batterie im Phasenraum mit unterschiedlichen Peakströmen

Die nach dem Peakstrom auftretenden unterschiedlichen Freilaufströme besitzen verschiedene Einflussfaktoren, die deren zeitlichen Stromverlauf im direkten Vergleich in Abb. 57 prägen.



**Abbildung 57:** Überlagerung des jeweils gleichen Peakstroms mit unterschiedlichem Freilaufverhalten

Die Analyse im Phasenraum in Abb. 58 der beiden Übergänge in die Freilaufphasen zeigt im Anschlussverlauf zunächst einen Verbleib im erreichten Flussbereich. Die Breite dieses Verbleibens ist tendenziell bei höherem Peakstrom und in der Phase Freilauf-gegen-Masse größer.



**Abbildung 58:** Darstellung der Überlagerung im Phasenraum

In der praktischen Realisierung kann eine magnetische Flussausprägung bei definiertem Peakstrom und anschließendem Freilauf-gegen-Masse ähnlich realisiert werden wie mit einem um 1 A niedrigeren Peakstrom und einer sich anschließenden Phase Freilauf-gegen-Batterie.

Eine somit gewonnene Einsparung an Boostenergie und damit eine Reduzierung der Kosten für den DC-DC-Wandler bringt einen batterieabhängigen Stromverlauf mit sich.

In Systemen mit einer geregelten Batteriespannung kann diese Variation der Batteriespannung eliminiert werden, was die Phase Freilauf-gegen-Batterie nach der Boostphase favorisiert.

## 5.7 Doppelpulsverfahren

Das Signalanalyseverfahren mit einem Doppelpuls wird prinzipiell in der Veröffentlichung von Denk [Den15c] beschrieben und konkret an einem Beispiel im Vortrag von Denk [Den16] dargestellt.

Die Grundidee dieses Verfahrens liegt darin, unter normalen Betriebsbedingungen einen speziellen adaptierten Stromverlauf zu generieren, um weitere Bewegungsinformation des analysierten Einspritzventils zu erhalten. Ein Teil des zusätzlichen Stromprofils soll im Hinblick auf Anker- und Nadeldynamik keine Bewegungsinformation beinhalten und gleichzeitig das Einspritzventil in seiner Funktionsweise nicht verändern.

Ermöglicht wird dies durch Implementierung einer weiteren Boostphase, die im Verlauf ähnlich oder gleich der Phase ist, die jeweils zu Beginn einer Einspritzung eingesetzt wird. Diese zweite Phase wird zeitlich in einen Bereich eingefügt, bei dem im Standardbetrieb die eigentliche Haltephase stattfindet.

Die entsprechenden Einspritzzeiten müssen zeitlich so lang sein, dass diese zweite Phase im abklingenden Freilauffall die eigentlichen Haltestromgrenzen, wie in Abb. 59 dargestellt, erreicht.

Da diese Zeiten aus der ersten Boostphase ermittelt werden können, die Einspritzzeit bei anstehendem Kraftstoffdruck und der angeforderten Kraftstoffmenge berechnet wird, ist die Implementierung des zweiten Pulses prädiktiv möglich. Der zweite Puls wird zeitlich so abgesetzt, dass sich die Ventilnadel und der Anker in einer statischen und hydraulisch offenen Position befinden, und somit keine Bewegung stattfindet.

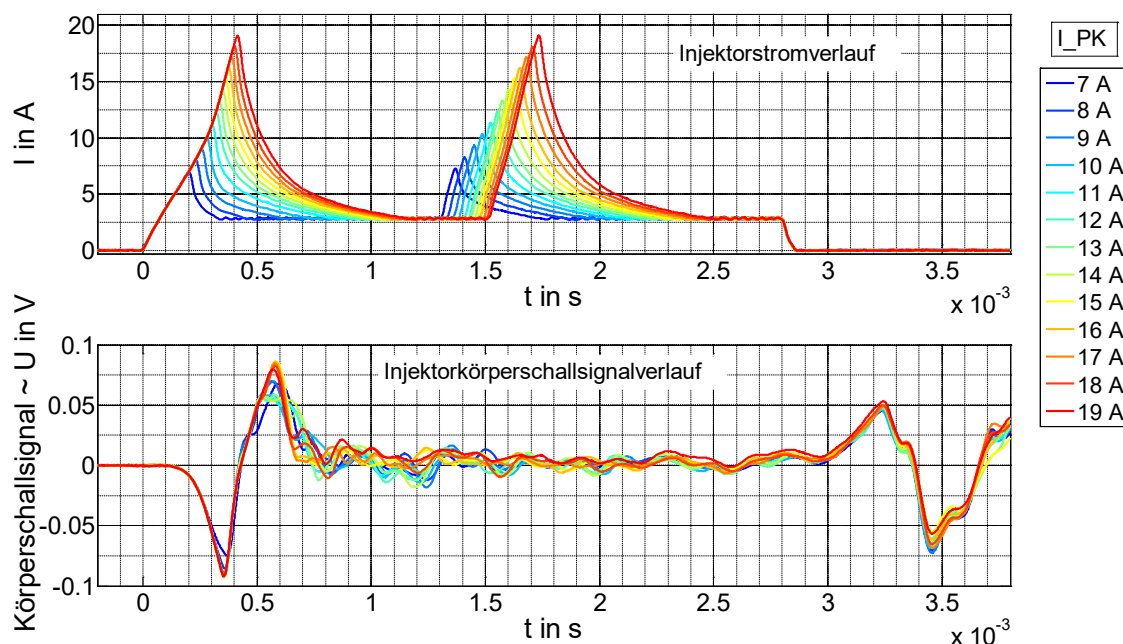
Die zusätzlich eingebrachte Boostenergie und der thermische Eintrag können vernachlässigt werden, da es nicht nötig ist, den Puls bei jedem Einspritzvorgang zyklisch zu generieren. Er dient als Beobachter und kann zum Zwecke der Verifikation in zeitlich großen Abständen neu generiert werden.

Die Analyse findet im Labor unter Trockenbedingungen statt. Verwendet wird das Einspritzventil VI. Das Stromprofil besteht aus einer ersten Boostphase mit einstellbarem Peakstrom. Nach dieser Boostphase erfolgt eine Phase mit Freilauf-gegen-Masse, bis das Haltestromniveau erreicht wird. Die Treibereinstellung wird so gewählt, dass sich nach der Boostphase und der Freilaufphase eine zeitlich im Spulenstrom geregelte Haltephase bilden kann, bevor die zweite Boostphase beginnt. Die Variation des Peakstroms in Abb. 59 erfolgt von 7 A bis 19 A in Schritten von einem Ampere. Die Einspritzzeit beträgt konstant

3 ms. Der Trigger der Aufzeichnung liegt am Ende der ersten Boostphase auf der absteigenden Flanke der Spulenspannung bei 50 V.

Die Annahme bei dieser Konfiguration ist, dass sich das Ende des hydraulischen Öffnungsvorgangs im Bereich der Phase Freilauf-gegen-Masse befindet, die sich zwischen der ersten Boostphase und vor der ersten Haltephase ergibt. Durch Variation des maximalen Peakstroms ergibt sich eine zeitliche Verschiebung des Öffnungsvorgangs. Mit zunehmendem Peakstrom wird die Öffnung in einen zeitlich früheren Bereich verschoben.

Das Ereignis des Ankeraufschlags, in Abb. 59 erkennbar als erstes zeitliches Minimum, wandert im Bereich Freilauf-gegen-Masse in Richtung höherem Freilaufstrom. Im Grenzfall fällt die Öffnung auf den Peakstrom selbst oder wandert in die Boostphase. Es folgt die Darstellung des Doppelpulses im Spulenstrom und dessen Auswirkung auf den Körperschall.

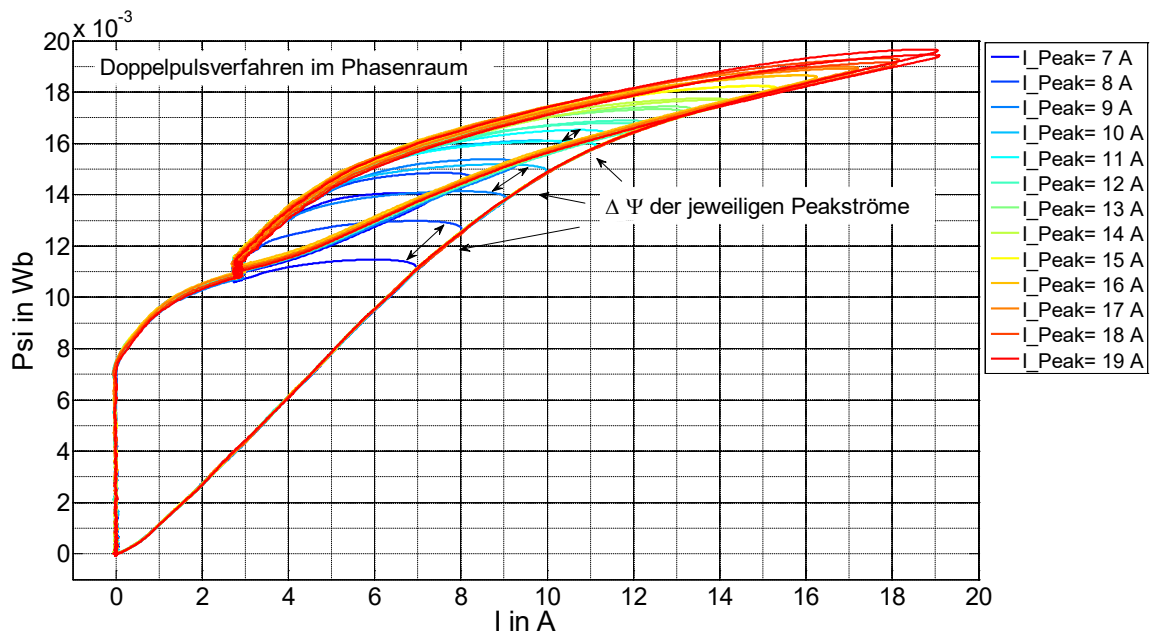


**Abbildung 59:** Doppelpuls mit nur einer Anker-/Nadelbewegung im ersten Pulsbereich

In der Analyse mit MATLAB ist in Abb. 60 beim Flussintegrationsverfahren der vorgegebene Widerstand so gewählt, dass sich die berechneten Flüsse im Gesamtverlauf geschlossen zeigen, wodurch sich ein magnetischer Fluss am Anfang und zum Ende der Integration von 0 Vs errechnet. Es ergibt sich folgende Gesamtdarstellung im Phasenraum.

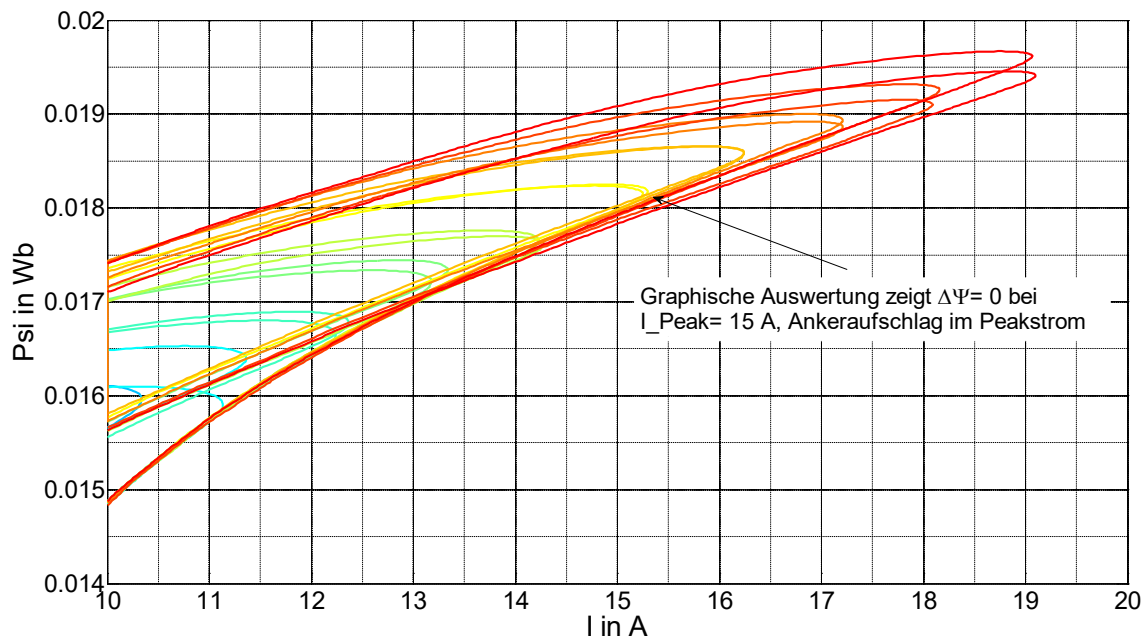


In der Phasenraumdarstellung in Abb. 60 zeigen sich Differenzen im Maximalfluss bei den jeweils gleichen Peakströmen. Diese Differenz wird umso kleiner, je größer der eingestellte Peakstrom ist. Der Grund liegt im vorhandenen Restluftspalt beim öffnungswirksamen Puls.



**Abbildung 60:** Doppelpuls im Phasenraum

Erreichen Anker und Nadel den Moment „Ende hydraulisches Öffnen“ exakt im Moment des Peakstroms, so liegt der sich einstellende Wert des magnetischen Flusses im gleichen Bereich wie der magnetische Fluss des zweiten Pulses. Es ergibt sich im Phasenraum in diesem Bereich in Abb. 61 ein gleicher Verlauf.



**Abbildung 61:** Ausschnitt des Doppelpulses im Phasenraum

Im Phasenraumausschnitt zeigen sich Abweichungen im Maximalfluss bei höheren Peakströmen, obwohl der Anker seine Endposition bereits erreicht hat. Die Analyse ergibt den jeweils kleineren Fluss beim zweiten Boostpuls. Hier wird der Einfluss der Erwärmung bemerkbar, die zu einer Widerstandserhöhung führt. Da das Integrationskonzept einen konstanten Widerstandswert annimmt, ergeben sich Abweichungen zum realen Fluss. Zu Beginn der zeitlichen Bestromung, in der ersten Boostphase, führt der reale kleinere Widerstand zu berechneten kleineren Flusswerten. In der zweiten Boostphase ist der reale Widerstand höher als der berechnete. Der berechnete magnetische Fluss ist in diesem Bereich zu hoch.

Das Doppelpulsverfahren ist ein potentiell Verfahren für eine geregelte Öffnungsdetektion.

Der Basis dieses Verfahrens liegt ein neuartiges Stromprofil zu Grunde, das im Vergleich von den technisch geläufigen Standardstromprofilen abweicht und in der Offenlegungsschrift von Denk [Den15e] dargestellt wird. Herkömmliche Stromprofile verfügen über eine erste Haltephase, die nach der Boostphase beginnt und der eigentlichen zweiten Haltephase vorgelagert ist. Diese erste Haltephase ist bei diesem Profil nicht mehr implemen-

tiert. Der Stromverlauf während des Freilaufs gegen Masse nach der Boostphase übernimmt die Funktion einer erhöhten ersten Haltephase, die ein sicheres und robustes hydraulisches Öffnen gewährleistet.

Zugleich nutzt die Patentschrift von Denk [Den15f] ein optimierbares Detektionsverfahren während des Freilaufs gegen Masse. Mit dem neuartigen Stromprofil ohne erste Haltephase wird durch eine individuelle Anpassung des Peakstroms die hydraulische Öffnung einerseits in den optimalen Detektionsbereich des Freilaufstroms geführt, andererseits damit auch die hydraulische Öffnung für jedes Einspritzventil hinsichtlich der benötigten elektrischen Energie zum sicheren und robusten hydraulischen Öffnen individuell eingestellt.

## 5.8 Quasistatischer Betrieb

Eine Sonderform der zeitlichen Bestromung ist der Betrieb des Einspritzventils mit einer permanent anliegenden kleinen Zustandsspannung im Bereich von 7 V. Mehrere Ziele werden hierbei verfolgt. Diese Sonderform der Ansteuerung liegt auch in der Offenlegungsschrift von Denk [Den12b] vor. Die erregende Zustandsspannung ist im Vergleich zur allgemein genutzten Boostspannung von nominal 65 V etwa um den Faktor 10 kleiner. Nimmt man in einer Abschätzung einen um den Faktor 10 kleineren Spulenstrom an und nimmt weiter nach Kallenbach [Kal12] über den quadratischen Zusammenhang zwischen Spulenstrom und Magnetkraft an, dass sich die erzeugte Magnetkraft etwa um den Faktor 100 verkleinert, werden sich in der auftretenden Kräftebilanz die anderen mechanisch zugrundeliegenden Kraftterme im Verhältnis zur Magnetkraft stärker ausprägen. Im Trockenbetrieb sind dies die Federkräfte und Reibungskräfte zwischen dem System aus Anker und Nadel und deren führenden Komponenten.

Der geringe Stromanstieg und damit auch der geringe magnetische Flussanstieg führt zu vernachlässigbarer Wirbelstromausprägung, so dass dieser Betrieb auch ohne starke Kraftdynamik erfolgt und als quasistationär angesehen werden kann. Diese Voraussetzungen führen dazu, dass Anker- und Nadelbewegungseffekte zeitlich langsamer und bei geringe-

rem Spulenstrom erfolgen. Da die Bewegungen im Flussbereich außerhalb des Sättigungsbereichs erfolgen, liegt die Vermutung nahe, dass die Ausprägungen der Bewegungsvorgänge im Phasenraum stärker erkennbar sind.

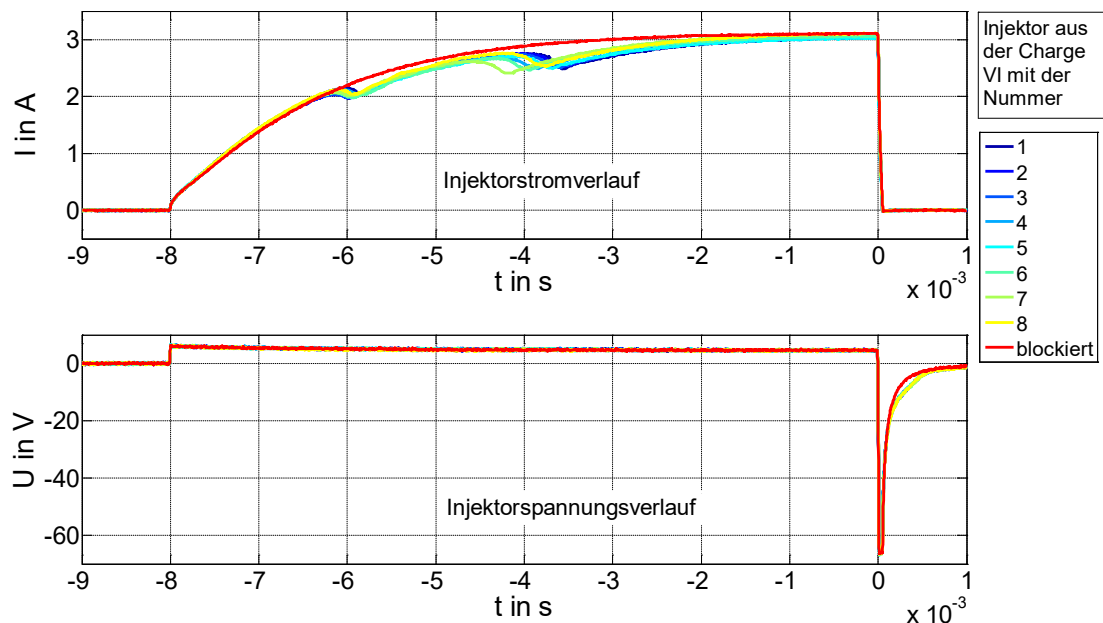
Das Verfahren ermöglicht den Vergleich von unterschiedlichen Einspritzventilen und Konzepten durch Differenzanalyse der Bewegungsvorgänge im Zeit- und Flussbereich. Da die Messungen in einem Spulenstrombereich liegen, bei dem der Grenzwert aufgrund des Ohmschen Gesetzes erreicht wird, kann der individuelle Widerstand direkt durch die statischen Größen von Spulenspannung und Spulenstrom ermittelt werden. Wenn die Windungsanzahl bei den Untersuchungen nicht bekannt ist, kann die Analyse des errechneten verketteten Flusses Aussagen über den magnetischen Arbeitspunkt des untersuchten Einspritzventils geben.

Die erste Versuchsreihe zeigt in Abb. 62 die Messungen einer Charge VII von acht Einspritzventilen mit zusätzlich einem mechanisch blockierten Einspritzventil V. Die Einspritzventile werden jeweils mit einer Spulenspannung von nominal 7 V mit einem Tastgrad (im Englischen Duty Cycle, DTC) von 100 % beaufschlagt. Die Einspritzzeit beträgt 8 ms, der Trigger liegt am Ende der zeitlichen Bestromung auf der Spulenspannung bei -60 V und einer abfallenden Flanke.

In Abb. 62 liegt im Zeitbereich wegen der geringen aktiven Zustandsspannung der Spulenstrom in einem maximalen Bereich von 3 A, da hier das System nach Gl. (3.22) im Bereich des Ohmschen Grenzwerts betrieben wird. Erkennbar ist dies zeitlich am Übergang in den fast horizontalen Spulenstromverlauf. Der Stromverlauf des blockierten Einspritzventils, in Abb. 62 rot dargestellt, ist kontinuierlich steigend. Die weiteren Einspritzventile besitzen jeweils zwei Minimumausprägungen im Stromverlauf, was charakteristisch für ein Einspritzventil mit einem Ankerfreiweg ist. Die Abweichungen zum blockierten Einspritzventil stellen im Bereich des ersten Minimums den Bewegungsvorgang des Ankers im Ankerfreiwegbereich, im Bereich des zweiten Minimums den Bewegungsvorgang des Ankers und der Nadel im Arbeitsluftspalt dar.

Die Variation im Spulenstromverlauf der einzelnen Einspritzventile lässt sich verschiedenen Ursachen zuordnen. Unterschiedliche Luftspaltmaße für den Ankerfreiweg oder den Arbeitshub führen bei gleichem Spulenstrom zu unterschiedlichen magnetischen Flüssen

und damit zu unterschiedlichen Magnetkräften. Das führt dazu, dass die Bewegungsvorgänge im Spulenstrom der Einspritzventile zu verschiedenen Zeitpunkten stattfinden. Zum anderen können auch unterschiedliche Vorspannungen der eingesetzten Federn zu einem zeitlichen Verändern der Bewegungsvorgänge im Spulenstrom führen, da die jeweils zur Bewegung notwendigen Magnetkräfte nach Gl. (3.17) unterschiedlich hoch sind.

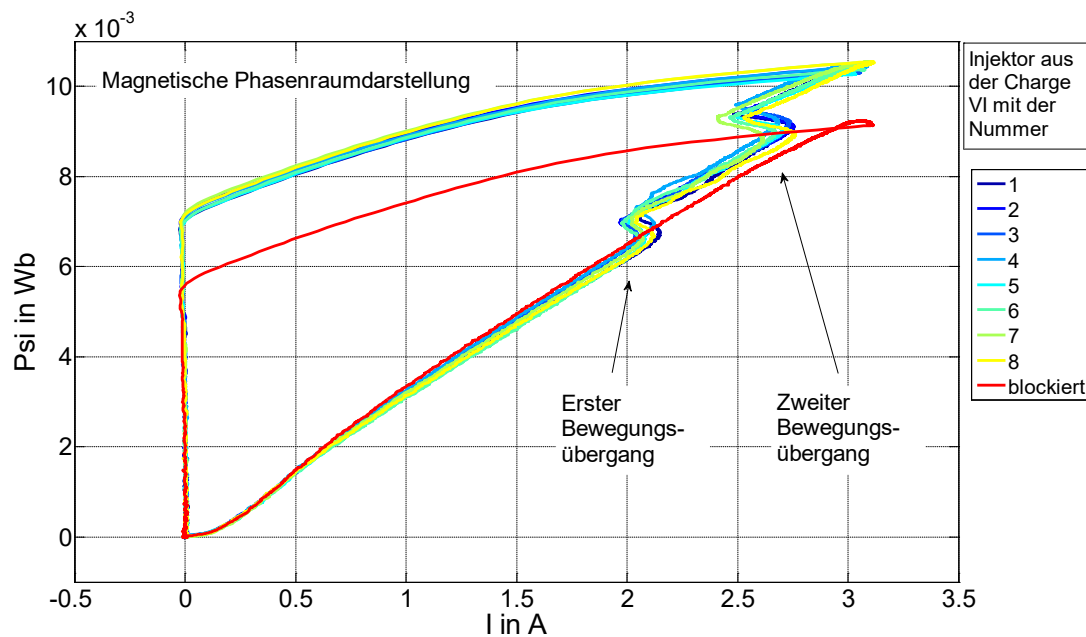


**Abbildung 62:** Kleinspannungsmessung 100% DTC mit Spulenstrom, ein Einspritzventil blockiert

Zur Phasenraumanalyse kann das Integrationsverfahren mit geschlossener Flusskurve herangezogen werden, da der aufgezeichnete elektrische Zeitbereich einen kompletten Zyklus überstreicht. Spulenstrom- und Spulenspannungswerte sind nach dem Ende der zeitlichen Bestromung abgeklungen.

Im Phasenraum in Abb. 63 beschreibt das blockierte Einspritzventil einen stetig monotonen Flussanstieg, der kurz vor Erreichen des Maximalstroms ein Flussmaximum erreicht. Grund für dieses Absinken ist hier die zeitliche Aufzeichnung der Spannung nach dem elektrischen Abschalten. Die Spulenspannung ist nicht ausreichend auf den Wert 0 V abgeklungen, was einem ungenügenden Abklingen des magnetischen Flusses am Ende der Aufzeichnung entspricht. Die Folge beim angewendeten Flussberechnungsverfahren über die geschlossene Integrationskurve ist ein nicht korrekt berechneter Widerstandswert.

Diese „Schleifenbildung“ ist bei den weiteren Einspritzventilen unterschiedlich stark ausgeprägt vorhanden, was auf unterschiedliche Restspannungen am Aufzeichnungsende hinweist. Bei diesen Einspritzventilen ist jedoch eine eindeutige Flussänderung bei beiden Bewegungsvorgängen zu erkennen. Der jeweilige Übergang führt zu einer neuen Magnetisierungskennlinie, die den jeweils veränderten Restluftspalt zuzuordnen ist.



**Abbildung 63:** Phasenraumdarstellung inklusive blockiertem Einspritzventil

Untersuchungen quasistationärer Vorgänge sind durch Radler [Rad40] und Maghyst der Firma Kendrion [Ken16] bekannt. Dieses Verfahren der Spannungsbeaufschlagung ist in einem Kraftfahrzeug anwendbar und ermöglicht die Ermittlung von sich über Lebensdauer verändernden mechanischen und hydraulischen Parametern, um gegebenenfalls eine Anpassung der Ansteuerstrategie des jeweiligen Einspritzventils vorzunehmen.

## 6. Hydraulisches Schließen

### 6.1 Beschreibung

Der Vorgang des hydraulischen Schließens beginnt beim elektromagnetischen Einspritzventil nach Abb. 20 in Abschnitt 3.3.2 mit dem Moment des elektrischen Abschaltens der Endstufe. Alle elektronischen Schalter des vorliegenden Einspritzmoduls werden zeitlich mindestens so lange ausgeschaltet, bis der hydraulische Schließvorgang beendet ist.

Der Abschaltvorgang erfordert ein Absenken des Spulenstroms unter einen Wert, der aufgrund der Kräftebilanz ein Überwiegen der Schließkräfte gegenüber der Summe aus den magnetischen Haltekräften nach Gl. (3.17) bewirkt und den hydraulischen Schließvorgang einleitet. Die Haltekräfte sind die Reluktanzkraft Term (4) nach Gl (3.15) und die Remanenzkraft Term (2) nach Gl (3.15). Die Auslegung des Magnetkreises des Einspritzventils schließt ein remanentes „Kleben“, wie es in der Dissertation von Rosenbaum [Ros11] näher beschrieben wird, aus. Die konstruktive Einbringung von „Antiklebscheiben“ sind hier beispielsweise eine wirksame Maßnahme, da gemäß Gl. (3.17) die Magnetkraft mit dem umgekehrt proportionalen Quadrat des Luftspalts zusammenhängt und somit abnimmt. Im Patent von Pohlmann [Poh14] wird das Beschichten des Ankers mit Chrom beschrieben, was neben der erhöhten Verschleißfestigkeit einen wirksamen, nicht magnetischen Abstand beim Anlegen des Ankers am Joch erzeugt.

Der Stromzielwert kann positiv, negativ oder 0 A werden. Im vorliegenden elektronischen Treiberkonzept wird der Spulenstrom zu 0 A geführt. Die zur Verfügung stehenden elektrischen Phasen sind die Abkommutierphase und im Sonderfall des Abschnitts 6.7 die Phase Freilauf-gegen-Masse.

Ein Betrieb mit Abkommutierung hat zur Folge, dass während der aktiven Abkommutierungsphase durch die hohe negative Spulenspannung und den damit verbundenen hohen negativen Stromgradienten der Magnetfluss entsprechend schnell abgebaut wird. Die starke Flussänderung induziert im leitfähigen Magnetmaterial Wirbelströme, die den Abbau des magnetischen Feldes zusätzlich verzögern.

Ähnlich dem magnetischen Flussaufbau bei dem hydraulischen Öffnen ist die Verzögerung bei einem zylindersymmetrischen System geometrisch im Magnetkern von außen nach innen wirkend. Theoretisch beginnt der Abbau auf der Manteloberfläche des Ankers sowie des Joches und setzt sich zeitlich Richtung Symmetrieachse fort.

Der eigentliche Schließvorgang beginnt, wenn die Summe aus dem zeitlich abklingenden Reluktanzfluss und dem Remanenzfluss im Einspritzventil einen Wert unterschreitet, der ein Ablösen des Ankers vom Ankerjoch zur Folge hat. Der Anker und somit auch die Nadel lösen sich gemäß Abb. 10 in Abschnitt 2.4.3 beim Einspritzventil ohne Ankerfreiweg und nach Abb. 13 in Abschnitt 2.5.3 beim Einspritzventil mit Ankerfreiweg vom Ankerjoch und bewegen sich, beschleunigt durch die Federvorspannung der Kalibrationsfeder, in Richtung der Ruhelage bei nicht bestromten Zustand.

## **6.2 Definition der Untersuchungen**

Die Untersuchungen im hydraulischen Schließen zielen auf die sensorische Analyse der elektrischen Parameter sowie die elektrische Variation der wirksamen Parameter und deren Einfluss auf das Schließen ab. Die sensorisch wirksamen induktiven und elektrischen Effekte werden in Abschnitt 6.3 zunächst über eine Separation in ein bewegungsunabhängiges Verhalten eingegrenzt und Einflüsse darauf ermittelt sowie charakterisiert. Mit diesem ermittelten statischen Verhalten erfolgt in Abschnitt 6.4 die Erweiterung auf das bewegungsabhängige Verhalten. Durch die ermittelten Kenntnisse soll das prinzipielle Signalverhalten ermittelt werden. Daraus können Konzepte für die Schließdetektion entwickelt werden. Neben den Untersuchungen der sensorischen Möglichkeiten soll ermittelt werden, inwieweit es möglich ist, den Schließvorgang elektrisch zu beeinflussen. In Abschnitt 6.5 wird ein Einfluss des Haltestroms sowie die Stärke des Einflusses untersucht.

Ähnlich wie beim hydraulischen Öffnen besteht die Vermutung, dass die zum Einleiten des Schließvorgangs nötige Abkommutierspannung bzw. Abschaltspannung in ihrer Höhe einen Zusammenhang zum Schließverhalten besitzt. Hierzu werden die Ergebnisse aus dem hydraulischen Experiment aus Abschnitt 5.3 im Bereich des elektrischen Abschaltens im Abschnitt 6.6 ausgewertet.



Die Sonderform des Abschaltens mit geringer Abschaltspannung, die Phase Freilauf-gegen-Masse, ist bei den vorliegenden Einspritzventilen eine Möglichkeit, den Schließvorgang signalinhärent im Spulenstrom beobachten und analysieren zu können, was in Abschnitt 6.7 erfolgt.

### 6.3 Abschaltspannung ohne Bewegung

Der Spannungsverlauf nach dem Ende der Einspritzzeit führt zum Aufbau einer negativen Spulenspannung. Nach dem vollständigen Abschalten der elektronischen Treiberendstufe erzeugt das Einspritzventil durch das Öffnen des elektrischen Stromkreises eine hohe Induktionsspannung, die durch die konzeptionelle Auslegung der Elektronik auf die negative Boostspannung begrenzt wird.

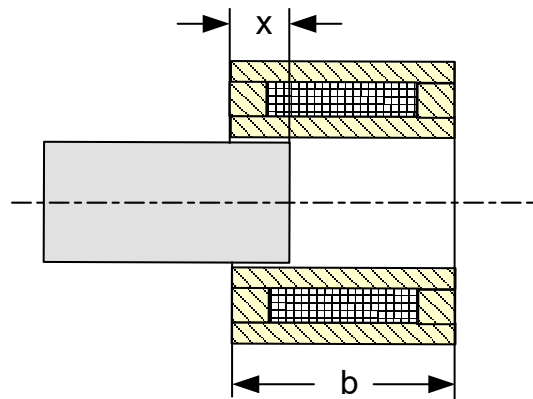
Um einen rein bewegungsunabhängigen Spannungsverlauf zu erhalten, kommt der in Abb. 64 und Abb. 65 dargestellte Prototyp VIII eines Einspritzventilspulenkörpers zum Einsatz. Dieser Spulenkörper, im Folgenden als Powergroup bezeichnet, wird experimentell mit einem zylinderförmigen, ferromagnetischen Werkzeugstahlbolzen erweitert. Die relative Lage  $x$  in Abb. 66 des Stahlbolzens zur Powergroup verändert sich schrittweise um  $\Delta x = 2 \text{ mm}$ . Nach jeder Neupositionierung ist der Bolzen fixiert und die Powergroup wird mit einem typischen Stromprofil erregt. Die elektrische Ansteuerzeit wird relativ lange eingestellt, um die Abschaltung in einer batteriegeordneten Haltephase durchzuführen und den anschließenden Abkommutierverlauf der Spulenspannung aufzuzeichnen.



**Abbildung 64:** Positionierter Stahlbolzen mit Powergroup



**Abbildung 65:** Separierter Stahlbolzen und Powergroup



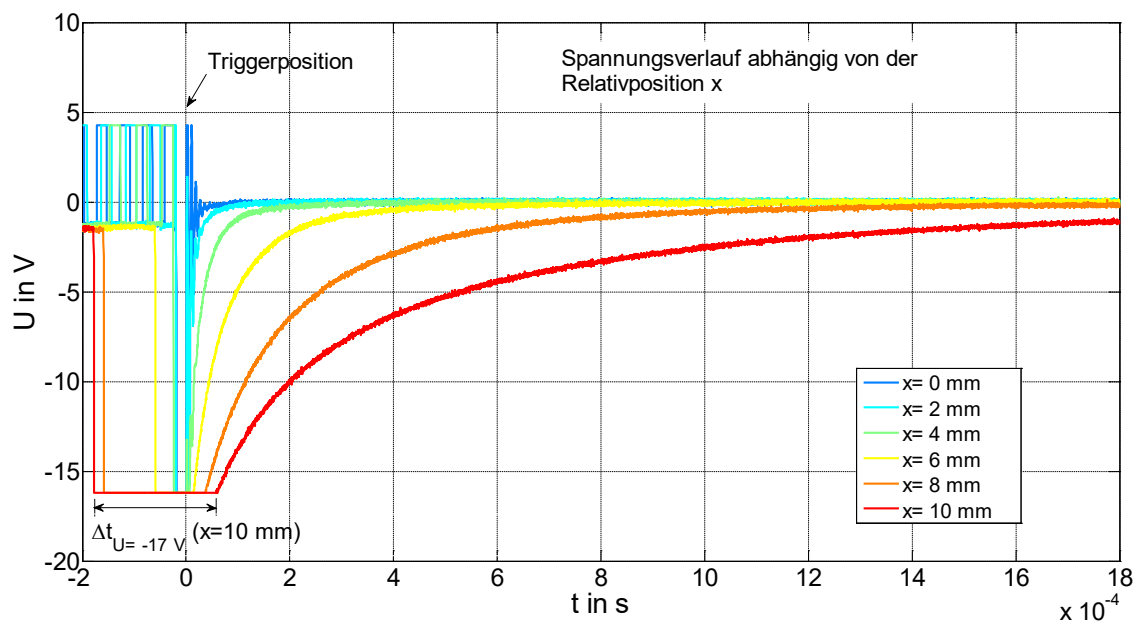
**Abbildung 66:** Skizze zur Definition der relativen Position  $x$  Stahlbolzen zur Powergroup

Die gemessenen Spulenspannungsverläufe sind in Abb. 67 dargestellt. Vor der relativen Positionierung des Werkzeugstahlbolzens wird der Spulenkörper zunächst alleine vermessen, was der Aufzeichnung mit dunkelblauer Linie entspricht. Die weiteren Messungen erfolgen mit schrittweise geänderter Relativposition des Bolzens.

Der Messbeginn erfolgt in Abb. 67 farbig rot bei der Relativposition  $x = 10$  mm, die Endposition liegt bei farbig blau und  $x = 0$  mm. Die Schrittweite  $\Delta x$  beträgt 2 mm. Der Triggerpunkt der Messaufzeichnung ist nach der Abkommutierphase die ansteigende Spulenspannungsflanke bei -22 V.

Der Spulenspannungsverlauf für alle Messungen ist auf -17 V begrenzt. Dies ist technisch bedingt und wird durch die hoch gewählte Amplitudenauflösung am signalaufzeichnenden Oszilloskop ausgelöst, um die Spulenspannungsverläufe im direkten Vergleich besser darstellen zu können. Aus diesem Grund ist die Triggerposition auch nicht direkt erkennbar.

Der Effekt dieser gewählten Darstellung führt dazu, dass alle Spulenspannungen, die weiter in den negativen Bereich als -17 V führen, auf -17 V begrenzt werden. Dieser Effekt wird bei den Messungen genutzt, um bei der jeweiligen Position  $x$  die zeitliche Dauer  $\Delta t_{U=-17\text{ V}}(x)$  zu untersuchen, bei der -17 V angezeigt wird. In der graphischen Darstellung ist dies exemplarisch für die Relativposition  $x = 10\text{ mm}$  eingetragen.



**Abbildung 67:** Powergroup-Bolzen-Spulenspannungsverlauf in Abhängigkeit der Position  $x$

Die Spulenspannungskurven zeigen in Abb. 67 nach dem zeitlichen Abkommutieren einen exponentiell abfallenden Verlauf, der je nach der Relativposition  $x$  eine unterschiedliche Stärke und Krümmung aufweist. Die zeitliche Dauer  $\Delta t_{U=-17\text{ V}}(x)$  des elektrischen Abkommutierens weist ebenfalls eine starke Abhängigkeit der Relativposition auf. Je breiter der zeitliche Verlauf ist, desto mehr magnetische Feldenergie wird nach Gl. (3.25) im Einspritzventil gespeichert. Qualitativ vergrößert sich die Spulenspannungs-Zeit-Fläche zwischen dem Beginn der Abkommutierung und dem vollständigen Abklingen der Spulenspannung auf 0 V, wenn mit größerem  $x$  der effektive Luftspalt der Anordnung aus Powergroup und Bolzen verkleinert wird und sich somit mehr magnetischer Fluss ausbilden kann. Damit vergrößert sich nach Gl. (3.23) die elektromagnetische Zeitkonstante.

Der starke negative Stromgradient während des Abschaltens führt zu einem starken Flussabbau. Da das Magnetmaterial eine hohe Leitfähigkeit aufweist, kommt es zu starken Wirbelstromaktivitäten und somit zusätzlich zu einer weiteren Verzögerung des Flussabbaus. Diese ist als zusätzliche zeitliche Verzögerungskomponente im exponentiellen Verlauf des Spulenspannungssignals enthalten. Der Spannungsverlauf ist ein Maß für den magnetischen Restflussabbau.

## **6.4 Abschaltspannung mit Bewegung**

Um den prinzipiellen Spulenspannungsverlauf eines Einspritzventils ohne Ankerfreiweg funktional zu charakterisieren, wird das relative Spulenspannungsverhalten nach dem Abschalten eines beweglichen und mechanisch blockierten Einspritzventils miteinander verglichen. Mit dem Einspritzventil I kommt in Abb. 69 ein instrumentiertes Einspritzventil zum Einsatz, bei dem sowohl der Nadelhub als auch das Körperschallsignal aufgezeichnet werden. Zum relativen Vergleich dienen zwei mechanisch blockierte Referenzen in Abb. 68 mit minimalem und maximalem Luftspalt. Für den minimalen Luftspalt ist dies das Einspritzventil VIII, bestehend aus der zuvor untersuchten Powergroup mit zentrisch fixiertem Stahlbolzen. Als Referenz mit maximal blockiertem Luftspalt dient Einspritzventil IX, ein Einspritzventil ohne Ankerfreiweg, dessen Einheit aus Anker und Nadel in der Ruheposition verklebt ist. Die Spulenspannungsverläufe der drei mechanisch ähnlichen Systeme werden zeitlich überlagert.

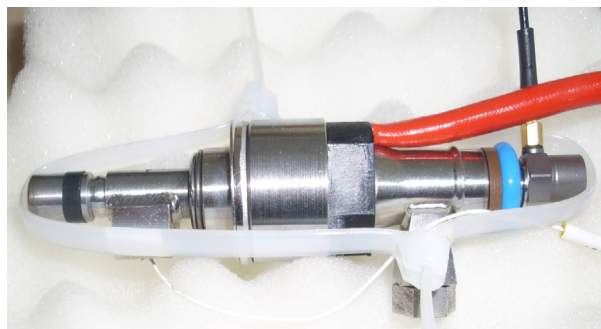
Einspritzventil IX, mechanisch



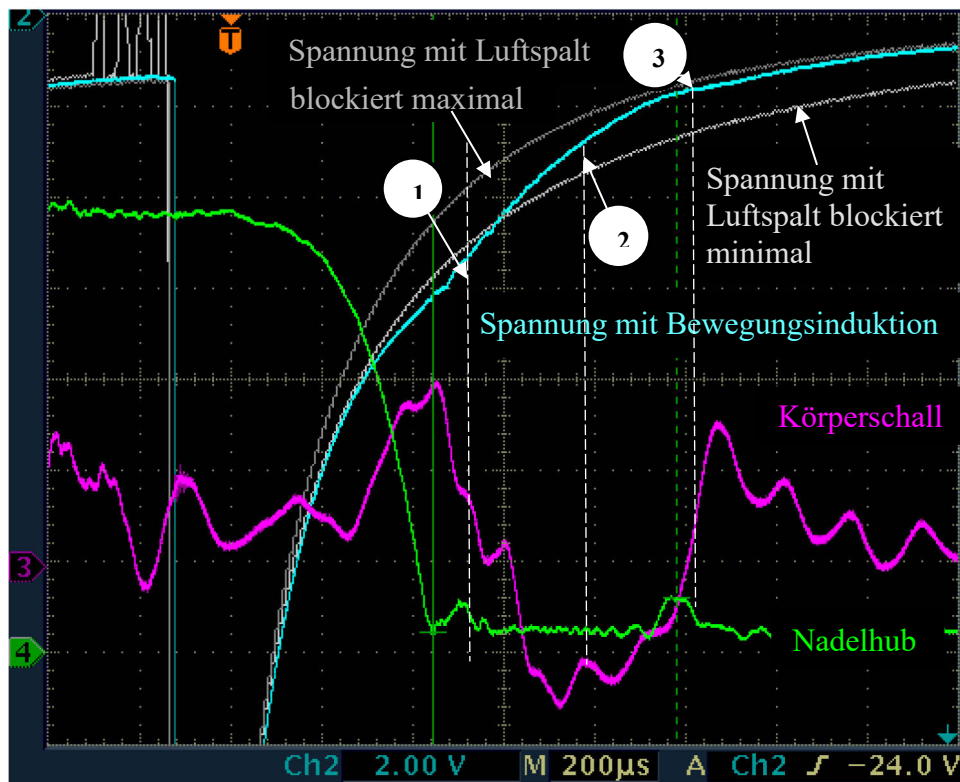
Prototyp VIII

**Abbildung 68:** Zwei mechanisch blockierte Referenzen

Einspritzventil I instrumentiert

**Abbildung 69:** Instrumentiertes Einspritzventil

Als Ansteuerprofil in Abb. 70 dient ein dem Experiment angepasstes Stromprofil. Die Ansteuerdauer ist derart gewählt, dass die untersuchten Einspritzventile und die Powergroup zeitlich mit einer Boostphase sowie einer ersten Haltestromphase elektrisch beaufschlagt werden und die Abschaltung aus der batteriegeordneten zweiten Haltestromphase erfolgt. Die einzelnen Messungen sind zeitlich so korreliert, dass sich die Abschaltspannungen von instrumentiertem Einspritzventil und den beiden Referenzen im exponentiell abklingenden Bereich bei -24 V überlagern. Dies entspricht dem Triggerpunkt der Aufzeichnung mit dem Oszilloskop. Dargestellt werden vom instrumentierten Einspritzventil die Abschaltspannung, der Verlauf des Nadelhubs und das erzeugte Körperschallsignal.



**Abbildung 70:** Spulenspannungsverläufe instrumentiertes Einspritzventil, Referenz minimaler Luftspalt und maximaler Luftspalt, Nadelhubsignal und Körperschallsignal

Der Spulenspannungsverlauf in Abb. 70 der beiden Grenzmuster hat einen stetigen und exponentiell abfallenden Charakter. Das in hydraulischer Nulllage blockierte Einspritzventil mit maximalem Luftspalt speichert bei definiertem Haltestrom eine geringere Feldenergie. Beim Feldabbau ergibt sich mit Gl. (3.25) und (3.23) eine kleinere Zeitkonstante im Abklingverhalten des magnetischen Flusses. Da der Abbau bei geringerem Fluss beginnt, ist mit einer kleineren Wirbelstromaktivität zu rechnen. Erkennbar ist dies an einer zeitlich schneller abklingenden dunkelgrauen Spulenspannungskurve. Die hellgraue Spulenspannungskurve der Referenz mit minimalem Luftspalt verläuft im untersuchten Bereich stets unterhalb der Referenz mit maximalem Luftspalt, da die Feldgrößen im gesamten Abklingverlauf entsprechend der höheren Magnetisierung ausgeprägter sind.

Das instrumentierte Einspritzventil in Abb. 70 besitzt blau dargestellt einen stetigen Spulenspannungsverlauf mit sich veränderndem Krümmungsverhalten und bezogen auf die

beiden blockierten Referenzen zwei relative Maximalabweichungen und einen Wendepunkt. Die beiden Referenzkurven bilden Asymptoten der Spulenspannung mit Bewegungsinduktion. Die Spulenspannung startet im Verlauf mit minimalem Luftspalt und klingt zum Verlauf mit maximalem Luftspalt ab.

Der Schließzeitpunkt der Nadel in Abb. 70 Position (1) mit dem geführten Anker korreliert mit der maximalen Abweichung relativ zur Referenz mit minimalem Luftspalt. Der Schließzeitpunkt ist ebenfalls deutlich im Körperschallsignal als erstes Maximum erkennbar. Der weitere Körperschallsignalverlauf weist ein Minimum auf. Dies ist erklärbar mit dem Anker-Nadel-Konzept des Einspritzventils ohne Ankerfreiweg. Um ein starkes Prelen beim hydraulischen Schließen zu vermeiden, sind Anker und Nadel mit einer Anti-Bounce-Feder gekoppelt. Sie ermöglicht, dass nach dem Nadelschließen der Anker einen gewissen Freiweg in Schließrichtung weiter zurücklegen kann, jedoch stetig durch die Feder abgebremst, gestoppt und entgegengesetzt beschleunigt wird.

Der Moment der Geschwindigkeitsumkehr in Abb. 70 Position (2) entspricht dem relativen Minimum im Körperschallsignal. Das Spulenspannungssignal zeigt hier einen Wechsel im Krümmungsverhalten. Die Ankerbeschleunigung führt in diesem Fall ohne hydraulischen Schließkrafteinfluss in Abb. 70 Position (3) zu einem unerwünschten Anheben der Nadel und daraus resultierend zu einem weiteren gemeinsamen Aufschlag von Anker und Nadel, erkennbar im zweiten Körperschallmaximum. Im Moment des Nadelöffnens erreicht der Anker seine Maximalgeschwindigkeit in hydraulischer Öffnungsrichtung. Das Spulenspannungssignal weist hier ein relatives Maximum zur Referenz mit minimalem Luftspalt und ein relatives Minimum zur Referenz mit maximalem Luftspalt auf.

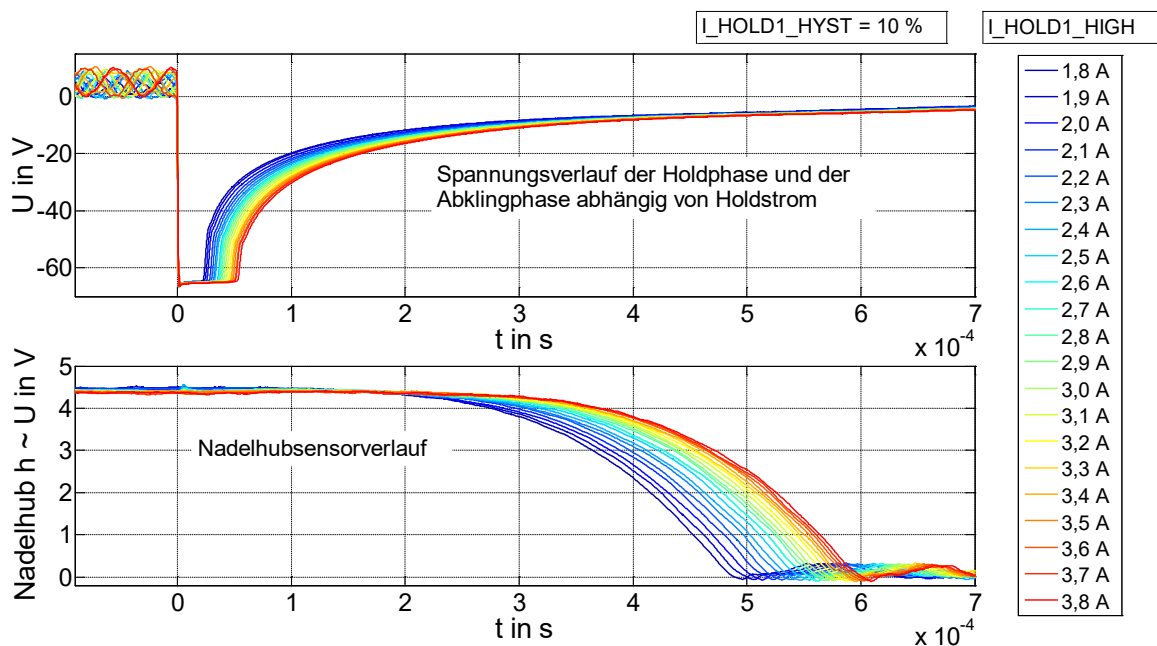
Die vorangegangene theoretische Betrachtung des Spannungsverlaufs stimmt mit der experimentellen Untersuchung überein.

## 6.5 Einfluss des Haltestroms

Ziel des Experiments ist es, einen Einfluss des eingestellten Haltestroms im Schließverhalten zu untersuchen. Im Feld ist der Haltestrom so ausgelegt, dass er gegen die Schließfederkraft und die hydraulische Kraft eine magnetische Haltekraft nach Gl. (3.17) erzeugt, die ein Verharren an der minimalen Luftspaltposition sicherstellt. Die Veröffentlichung von Hoang [Hoa06] beschreibt unter anderem die Variation dieses Haltestroms eines Einspritzventils für unterschiedliche Lastbereiche des Motors. Der aus diesem Spulenstrom resultierende Magnetfluss und die damit gespeicherte Feldenergie muss nach dem Ende der Einspritzung im Einspritzventil abgebaut werden. Beim Unterschreiten eines bestimmten magnetischen Flusses wird die reluktante Haltekraft zu gering und der hydraulische Schließvorgang beginnt. Um diesen Schließvorgang direkt beobachten zu können, wird der Nadelhubsensorverlauf des Einspritzventils I im Trockenbetrieb bei Variation des Haltestromniveaus untersucht.

Die obere Haltestromgrenze  $I\_HOLD1\_HIGH$  wird von 1,8 A bis 3,8 A in Schritten von 0,1 A geändert. Der untere Haltestromwert  $I\_HOLD1\_HYST$  liegt jeweils 10 Prozent unter dem Wert der oberen Haltestromgrenze. Die Aufzeichnung beginnt mit dem Trigger auf die abfallende Spulenspannungsflanke nach dem Beginn der Abkommutierung bei -50 V. In Abb. 71 ist die mit steigendem Haltestrom größer werdende aktive Zeit der Abkommutierung erkennbar. Dieses Verhalten wird in der weiteren Analyse des Spulenstroms in Abb. 72 erklärt.





**Abbildung 71:** Spulenspannungsverlauf Einspritzventil I in  
Abhängigkeit des Haltestroms

Es liegt in Abb. 72 ein direkter Zusammenhang zwischen dem Haltestromniveau und der Schließzeit vor. Je höher der eingestellte Haltestrom, desto später findet der Schließvorgang statt.

Der in Abb. 63 bei den quasistationären Untersuchungen vorliegende, annähernd lineare Zusammenhang zwischen dem Spulenstrom und dem magnetischen Fluss im Bereich bis 3 A, lässt die Annahme einer konstanten differentiellen Induktivität zu. Die magnetische Energie bei konstanter Induktivität verhält sich nach Gl. (3.25) proportional mit dem Quadrat des Spulenstroms.

Da die Zeitkonstante mit Gl. (3.23) konstant bleibt, ist beim Abschalten von einem höheren Haltestromniveau aus ein zeitlich längerer Spulenstromabbau erkennbar.

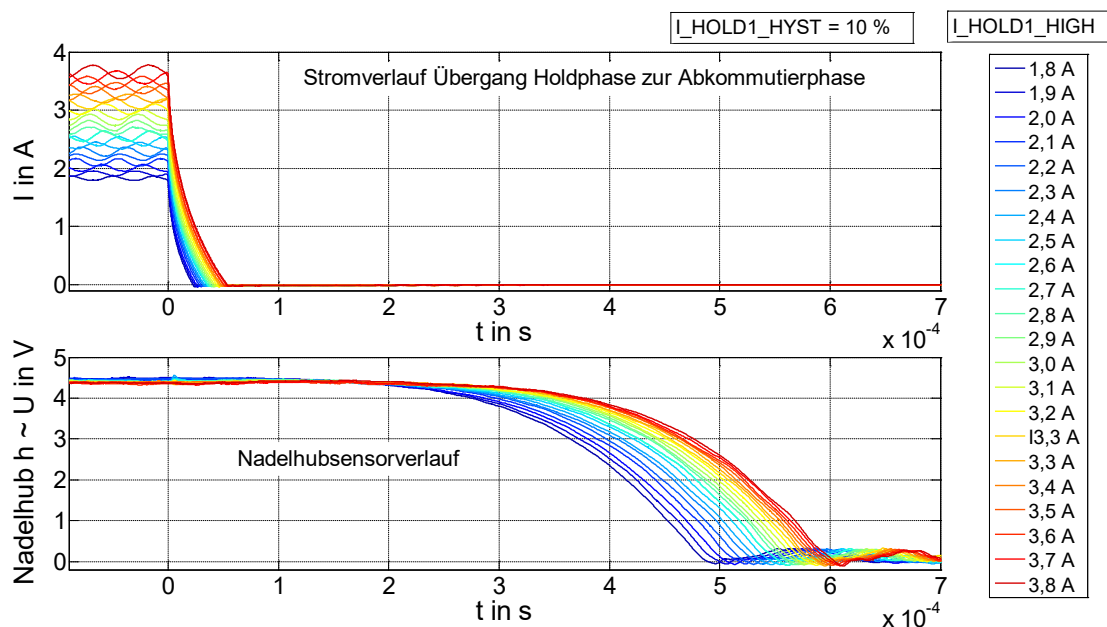
Damit kann das Verhalten der Schließzeit über den Haltestrom hinsichtlich seiner eingestellten Höhe gesteuert und optimiert werden, was zu einem gewünschten früheren hydraulischen Schließen führt.

Dieses Verhalten wird bei Wan [Wan10] unter hydraulischen Druckbedingungen bestätigt. Es existiert in den Untersuchungen eine untere Haltestromschwelle, bei der das Einspritzventil nicht mehr durch die erzeugte magnetische Haltekraft hydraulisch offengehalten werden kann.

Da die Regelhysterese der beiden Stromwerte je nach Einspritzzeit dazu führt, dass das Abschalten abhängig von der Einspritzzeit zwischen der oberen und unteren Haltestromgrenze erfolgt, kommt es zu leicht unterschiedlichen Schließverhalten.

Die Untersuchung durch die gewählte Abstufung in den Haltestromgrenzen in Abb. 72 führt zu einer Überlappung der unteren und oberen Haltestromgrenzen der einzelnen Messungen.

Somit wird ein Einfluss der Größe der Stromhysterese im Schließverhalten bestätigt. Eine geringere Hysterese in der Haltestromregelung erhöht die Genauigkeit des Schließvorgangs.



**Abbildung 72:** Nadelhubsensorverlauf des Einspritzventils I in  
Abhängigkeit des Haltestroms

## 6.6 Einfluss der Abschaltspannung

Wie bei der Variation des Haltestroms liegt die Vermutung vor, dass eine Variation der Abkommutierspannung zu Veränderungen im Schließverhalten führt.

Für die vorliegende Einspritzelektronik wird im Abschnitt 3.3.2 Abb. 20 gezeigt, dass beim Abschalten elektrische Energie in den DC-DC-Wandler zurück geladen wird. Eine Veränderung der Boostspannung ist aufgrund des Elektronikkonzepts in Abb. 20 mit der gleichen Änderung der Abkommutierspannung verbunden.

In Abschnitt 5.2 ist im Zusammenhang mit der Analyse des Öffnungsverhaltens eines Einspritzventils die Variation der Boostspannung untersucht worden. Die Messergebnisse können somit für eine Analyse des Schließverhaltens unter hydraulischen Druckbedingungen genutzt werden. Das untersuchte Einspritzventil ist das Einspritzventil mit Ankerfreiweg II. Der Einspritzdruck liegt nominal bei 350 bar.

Die Messparameter sind gemäß Abb. 73 die variierte Boostspannung und der Peakstrom. Aufgezeichnet sind die Spulenspannung, der Spulenstrom und der Ratenverlauf. Der zur graphischen Darstellung gewählte exemplarische Datensatz ist die Messung mit 10 A Peakstrom.

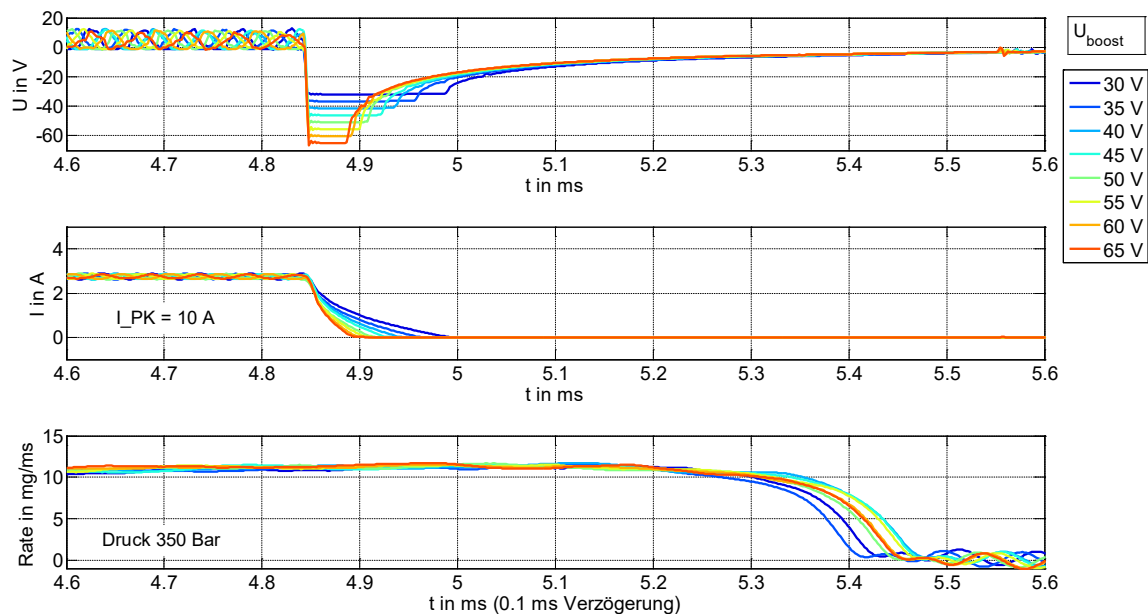
Das hydraulische Abfallverhalten in Abb. 73 ist unabhängig vom eingestellten Peakstrom, da in allen Messungen die Einspritzzeit von 3 ms dazu führt, dass das Einspritzventil zeitlich aus der Haltephase mit gleich eingestelltem Haltestrom abgeschaltet wird.

Es liegen aufgrund der Untersuchungen des Öffnungsverhaltens in Abschnitt 5.3 durch die unterschiedlichen Einstellungen des Peakstroms weitere Ergebnisse zum hydraulischen Schließverhalten im Anhang 8.2 vor. Diese werden genutzt, um die Analyse und Interpretation des Verhaltens durch eine größere Anzahl von Messungen zu unterstützen.

Die Analyse zeigt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Breite der aktiven Abkommutierzeit bzw. dem Abfallverhalten des Spulenstroms und der eingestellten Abkommutierspannung. Mit Reduzierung des Betrags der Abkommutierspannung verlängert sich das zeitliche Abklingverhalten im Spulenstrom. Dieses Verhalten und desweiteren einen

direkten Zusammenhang mit dem hydraulischen Schließverhalten beschreibt die Arbeit von Ulm [Ulm07].

Die Auswertung von Abb. 73 und dem Anhang in Abschnitt 8.2 zeigt bei diesem Einspritzventil keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Schließzeit und der jeweils gewählten Abkommutierspannung.

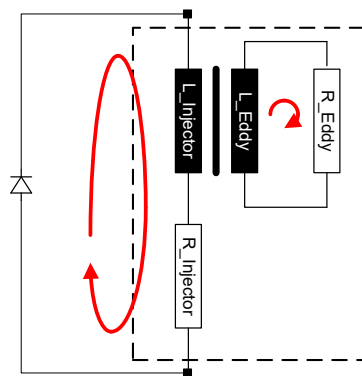


**Abbildung 73:** Variable Boostspannung über Abkommutierstrom und Ratenverlauf, Peakstrom 10 A

Eine Ursache dieses Verhaltens des untersuchten Einspritzventils kann der hydraulische und mechanische Einfluss beim Schließverhalten sein. Hier sind Schwankungen im anliegenden Kraftstoffdruck direkt an der Anschlussstelle des Einspritzventils eine mögliche Ursache. Dieser Einfluss ist nicht direkt nachweisbar, da ein Drucksensor an der Anschlussstelle nicht verfügbar ist. Weitere Versuche mit der Abänderung der experimentellen Konfiguration sind deshalb notwendig.

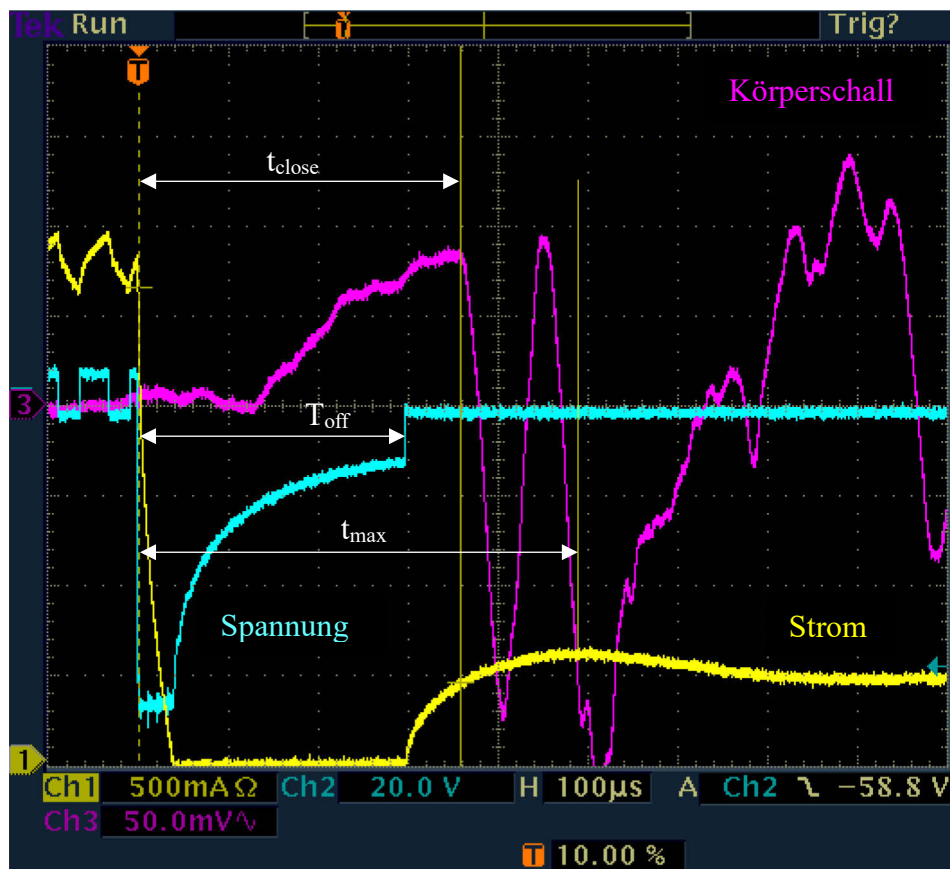
## 6.7 Abschaltstrom mit Bewegung

Ein alternatives Verfahren zum hydraulischen Schließen eines Einspritzventils ist, das Einspritzende im Gegensatz zum üblichen Abkommutiervorgang mit der Phase Freilauf-gegen-Masse einzuleiten. Elektrisch umgesetzt bedeutet dies, mit Hilfe einer geeigneten Treiberansteuerung nach einer definierten Zeit  $T_{\text{off}}$  nach Beginn der Abkommutierphase den Lowside-FET, wie in Abb. 74 dargestellt, wieder anzusteuern. Im Experiment wird diese relative Zeit variiert und der wieder auftretende Stromverlauf analysiert. Gleichzeitig erfolgt die Aufzeichnung des vom Einspritzventil generierten Körperschallsignals, um damit die Schließzeit  $t_{\text{close}}$  zu ermitteln. Die Messung erfolgt trocken mit dem Einspritzventil ohne Ankerfreiweg X.



**Abbildung 74:** Elektrische Darstellung des Freilaufstroms und des Wirbelstroms

Eine exemplarische Messung zeigt in Abb. 75 für die Zeit  $T_{\text{off}} = 300\mu\text{s}$  den Spulenstrom- und Spulenspannungsverlauf sowie das Körperschallsignal.



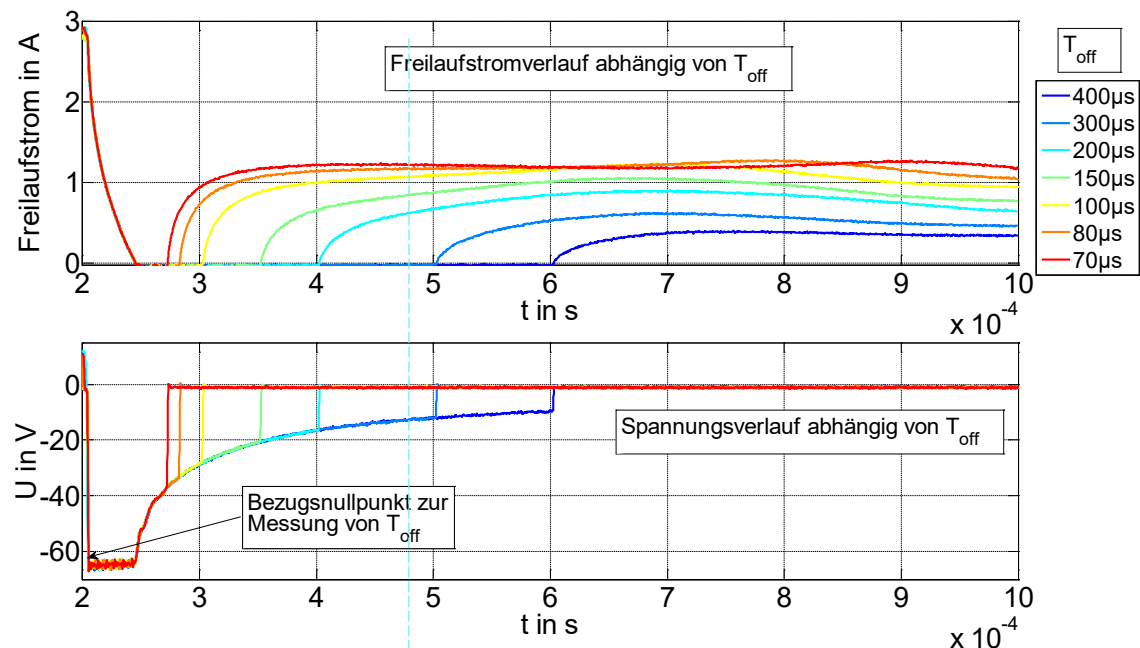
**Abbildung 75:** Beispiel Spulenstrom, Spulenspannung und Beschleunigungssensorsignal

Die Abb. 76 zeigt den Spulenstrom- und Spulenspannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit  $T_{off}$ . Bei allen eingestellten Zeiten, zu denen der Lowside-FET wieder aktiviert wird, kommt es zum Beenden des exponentiellen Abklingverhaltens der Spulenspannung. Es entsteht gemäß der Beschreibung der Phase Freilauf-gegen-Masse in Abb. 19 eine geringe negative Spulenspannung. Diese bildet sich aus der Summe des Spannungsabfalls an der Diode in Abb. 74 und den gesamten restlichen Ohmschen Spannungsabfällen im Freilaufkreis, die durch den wieder generierten Stromfluss entstehen.

Der Freilaufstrom erreicht für alle Zeiten von  $T_{off}$  nach einer bestimmten Zeit ein Maximum und klingt danach wieder ab. Im Falle von  $T_{off} = 70 \mu s$  sind zwei Maxima erkennbar.

Der in Abb. 76 analysierte und zu einem Stromfluss führende elektronische Eingriff ist vom energetischen Gesichtspunkt passiv einzustufen, da der beobachtbare Spulenstrom nicht von einer externen elektrischen Energiequelle dem Einspritzventil zugeführt wird,

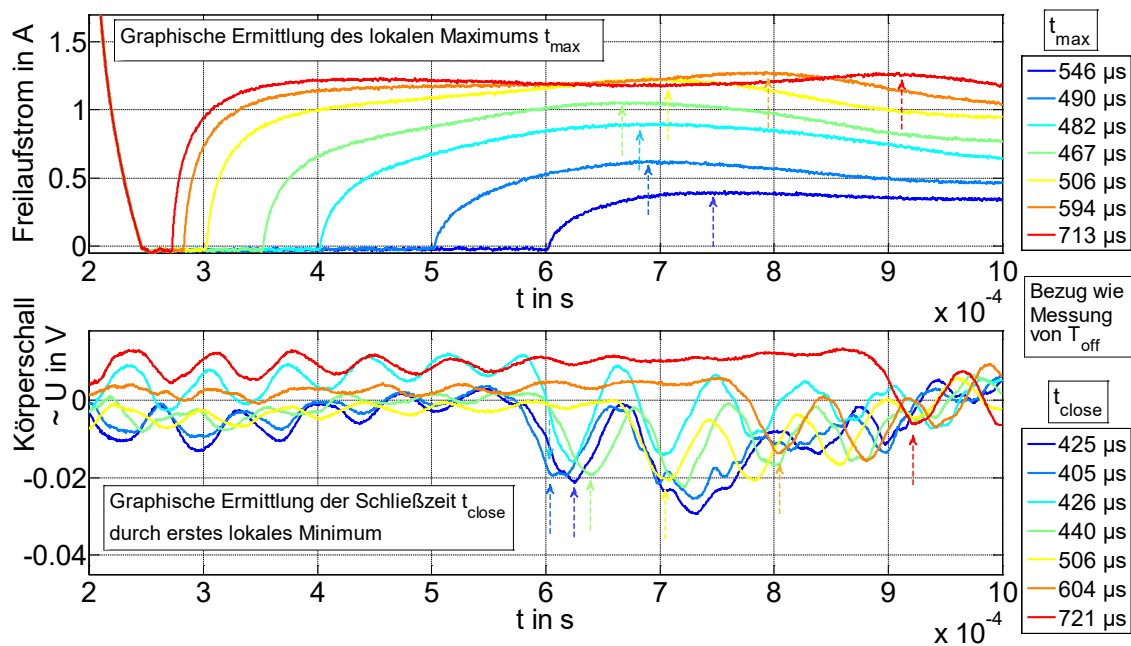
sondern von Induktionseffekten des Einspritzventils herrührt. Der Abbau des Magnetflusses erfolgt räumlich gesehen im Vergleich zu einem herkömmlichen Abklingvorgang in der Restspannung auf eine andere Art und Weise.



**Abbildung 76:** Darstellung von Spulenfreilaufstrom und der Spulenspannung in Abhängigkeit der Variation von  $T_{off}$

Der neu generierte Stromfluss kann nur aus der Entnahme und Umwandlung von magnetischer Restenergie aus dem Einspritzventil stammen. Der Freilaufstrom führt wiederum in der Spule des Einspritzventils zu einem magnetischen Fluss. In Summe bedeutet dies, dass im Vergleich zum herkömmlichen magnetischen Flussabbau über die abklingende Restspannung der magnetische Fluss durch den generierten Freilaufstrom räumlich verändert und mit größerer Zeitkonstante abklingt. Dies führt zu einem langsameren Magnetkraftabbau, was im verzögerten Schließverhalten erkennbar ist.

Um den Zusammenhang zwischen dem Verlauf des Freilaufstroms und der mechanischen Schließzeit zu untersuchen, wird die jeweilige Schließzeit  $t_{close}$  graphisch durch die Auswertung und Erfassung des ersten Minimums des Körperschallsignals in Abb. 77 ermittelt. Die im Stromverlauf auftretenden Maxima werden graphisch ermittelt und jeweils einer Zeit  $t_{max}$  zugeordnet.



**Abbildung 77:** Darstellung von Freilaufstrom und Körperschallsignal des Einspritzventils in Abhängigkeit der Variation von  $T_{\text{off}}$

Die Wiedereinschaltzeit sowie die Aufschlagzeit  $t_{\text{close}}$  des Ankers und der Nadel als auch die Zeit des Freilaufstrommaximums  $t_{\text{max}}$  werden in Tab. 3 aufgetragen.

Messung x	$T_{\text{off}} [\mu\text{s}]$	$t_{\text{close}} [\mu\text{s}]$	$t_{\text{max}} [\mu\text{s}]$	Korrelation mit $I_{\text{Max}}$
1	400	425	546	nein
2	300	405	490	nein
3	200	426	482	nein
4	150	440	467	nein
5	100	506	506	ja
6	80	604	594	ja
7	70	721	713	ja

**Tabelle 3:** Abhängigkeit von  $T_{\text{off}}$  mit Freilaufstrommaximum  $t_{\text{max}}$  und Aufschlagszeit  $t_{\text{close}}$

Das Stromanalyseverfahren bietet sich als potentiell Detektionsverfahren an. Es entsteht ein auswertbares Maximum im Spulenstrom, welches mit dem verzögerten Schließvorgang korreliert.



## **7. Zusammenfassung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Vorgänge und Steuerungsmöglichkeiten des dynamischen Einspritzverhaltens von elektromagnetischen Einspritzventilen mittels der Ansteuerelektronik umfassend darzustellen. Dazu wurde ein systematischer Einblick in das Einspritzsystem moderner Ottomotoren vermittelt.

Das Einspritzventil, dessen Hauptaufgabe es ist, die Kraftstoffmenge präzise zugemessen und von Tröpfchengröße und Tröpfchenverteilung her optimiert aufbereitet im Brennraum zur Verfügung zu stellen, ist das zentrale mechatronische Element dieses Systems. Die Kraftstoffaufbereitung und die gesetzlichen Vorgaben an Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionslimits bestimmen in hohem Maße die geforderte Dynamik des Einspritzventils.

Die dem Einspritzventil zur Verfügung gestellte elektrische Energie wird partiell in magnetische Energie umgewandelt, aus der teilweise mechanische Arbeit geleistet wird, die wiederum zum hydraulischen Einspritzvorgang führt.

Es wurden Erkenntnisse über den Einfluss auf diesen Vorgang gewonnen, welche durch die Variation der eingetragenen elektrischen Energie entstehen. Dieser Einfluss wirkt sich auf das Verhalten des Einspritzventils als Aktuator sowie auf seine elektromagnetisch sensorischen Eigenschaften aus.

Mit den Sensoreigenschaften des Einspritzventils können mechanische und hydraulische Reaktionen über die induktive Rückwirkung registriert und abgeleitet werden, wenn das mechanische Konzept des Einspritzventils ausreichend bekannt ist.

Die simultane Abtastung der elektrischen Größen Spulenstrom und Spulenspannung bietet neben der zeitlichen mathematischen Auswertung die Basis für die Entwicklung eines physikalischen Modells der integralen Größe des verketteten magnetischen Flusses. Hier wurde für die Berechnung des magnetischen Flusses ein neues Verfahren angewendet. Die elektronischen Umgebungsbedingungen im Kraftfahrzeug ermöglichen Variationen in der Modellbildung. Die Modelle bieten die Möglichkeit der Analyse magnetischer Niveaus

und inhärenter Signalausprägungen sowie bei niedrigdynamischen Prozessen die Grundlage bei der Diskussion mechanischer Kenngrößen wie z.B. dem Luftspaltabstand.

Die untersuchten Verfahren und Methoden ordnen sich in die Bereiche aktiver Öffnungsbetrieb und aktive Öffnungsdetektion sowie passive Schließdetektion ein. Der Begriff „aktiv“ ist so zu verstehen, dass das untersuchte Ereignis hydraulisches Öffnen und Beginn der Einspritzung, energetisch in den Bereich der aktiven Bestromung des Einspritzventils fällt und somit auch aktiv durch die Elektronik beeinflussbar ist.

Dem gegenüber wird am Ende der hydraulischen Einspritzung gefordert, durch elektrisches Abschalten möglichst schnell die gespeicherte magnetische Energie des Einspritzventils abzubauen. Das hydraulische Schließereignis findet im stromlosen Bereich in der passiven Zone bei abklingender Restspannung statt.

Unterschiedliche elektrische Aktivierungen wurden im Zusammenhang mit dem hydraulischen Öffnen untersucht und potentielle Detektionsverfahren, die mit der aktiven Bestromung zeitlich korrelieren, ermittelt.

Die Optimierung des Systems erfolgte hinsichtlich elektrischer Energieaufnahme und einem robusten hydraulischen Öffnen. Zusammenfassend zeigte sich, dass, unabhängig vom Konzept der untersuchten Einspritzventile, die Boostspannung, die Art des Freilaufs nach dem Peakstrom und der Peakstrom selbst die elektrischen Stellgrößen darstellen.

Die Analyse der Stärke der Signalausprägung für die Detektion von Beginn und Ende des hydraulischen Öffnens wird durch die Betrachtung im magnetischen Phasenraum erweitert. Eine mechanische Analyse des Einspritzventils ist durch das Sonderstromprofil mit kleiner Ansteuerspannung magnetisch quasistationär durchführbar. Die Einsatzmöglichkeit ist hier z.B. eine magnetische Luftspaltmessung in der Einspritzventilfertigung.

Das hydraulische Schließen sowie die dabei im Einspritzventil stattfindenden Bewegungen liegen elektrisch in einem abklingenden Spulenspannungsbereich. Der Grund liegt in dem sich räumlich unterschiedlich exponentiell abbauenden magnetischen Fluss und der Ankerdynamik. Der theoretische Spulenspannungsverlauf wurde mittels Superposition der

stromabhängigen Induktion und der Bewegungsinduktion hergeleitet und ist damit die Basis für mathematische Analyseverfahren zum Ermitteln des hydraulischen Schließereignisses.

Das Einspritzventil für die Untersuchung bei unterschiedlichen Abkommutierspannungen zeigte keine eindeutig erkennbaren Korrelationen oder Tendenzen im Zusammenhang mit dem hydraulischen Schließen. Zur Ermittlung des hydraulischen Einflusses sind weitere Analysen notwendig.

Ein direkter Zusammenhang des Schließverhaltens ist in der Größe des Haltestroms erkennbar. Der Wert für ein frühes hydraulisches Schließen wird so weit herabgesetzt, dass einerseits das Einspritzventil in der aktiven zeitlichen Bestromung sicher seinen hydraulisch offenen Zustand beibehält, andererseits der hydraulische Schließvorgang so früh wie möglich einsetzen kann.

Im magnetischen Phasenraum stellte sich der hydraulische Schließbereich nicht dar. Die magnetische Flusslinie erscheint als Senkrechte, da kein messbarer elektrischer Leitungsstrom mehr vorlag. Das hydraulische Schließen mit Freilaufstrom-gegen-Masse zeigte eine Zuordnungsmöglichkeit des Maximums im Spulenstrom zum Schließvorgang, hat aber zur Folge, dass der Schließvorgang hierbei unerwünscht verzögert wird und somit bei dem untersuchten Einspritzventil dieses Detektionsverfahren nur bedingt geeignet ist.

Signalausprägungen in der Spulenspannung zeigten wenig Sensibilität hinsichtlich des Einflusses von elektronischen Variationen in der Ansteuerung.

Ausblickend werden weitere Untersuchungen des berechneten magnetischen Flusses mit der Entwicklung neuartiger Analysemethoden im Phasenraum und im Zeitbereich vorgeschlagen, die z. B. den Ansatz eines magnetkraftgeregelten Systems, realisierbar machen.



## 8. Anhang

### 8.1 Einfluss der Boostparameter

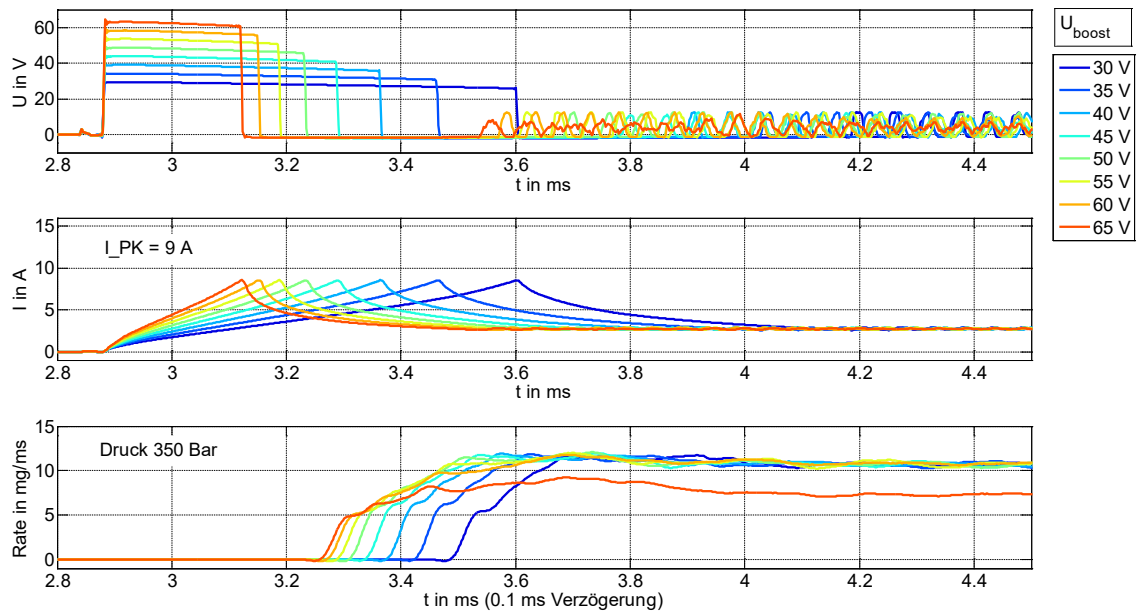


Abbildung 78: Ratenverlauf 9 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung

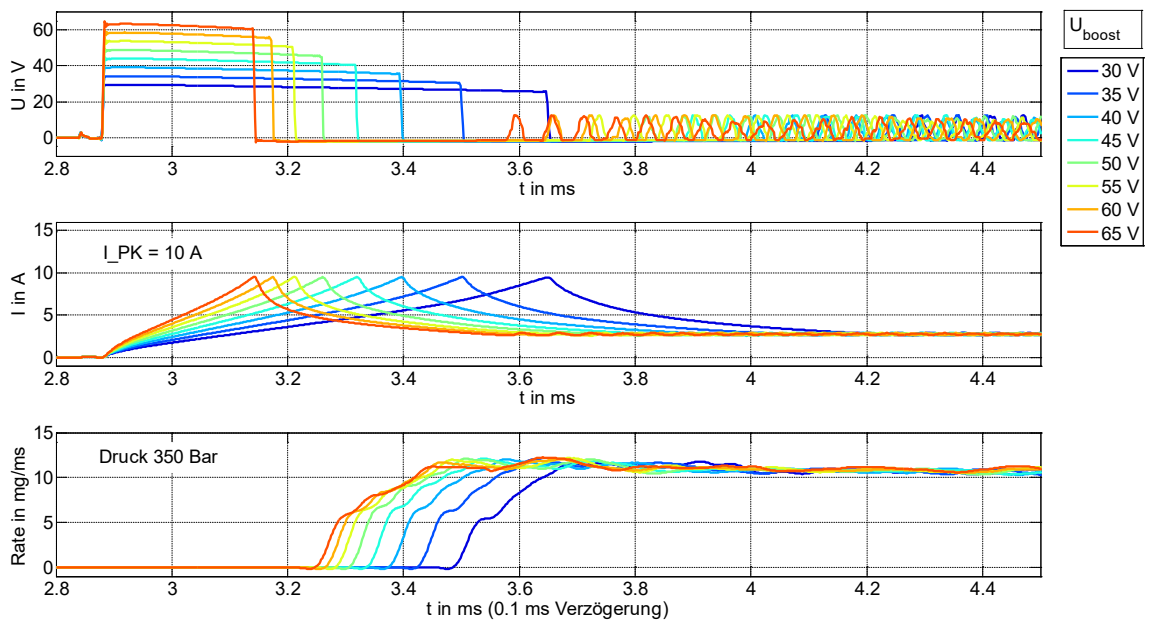
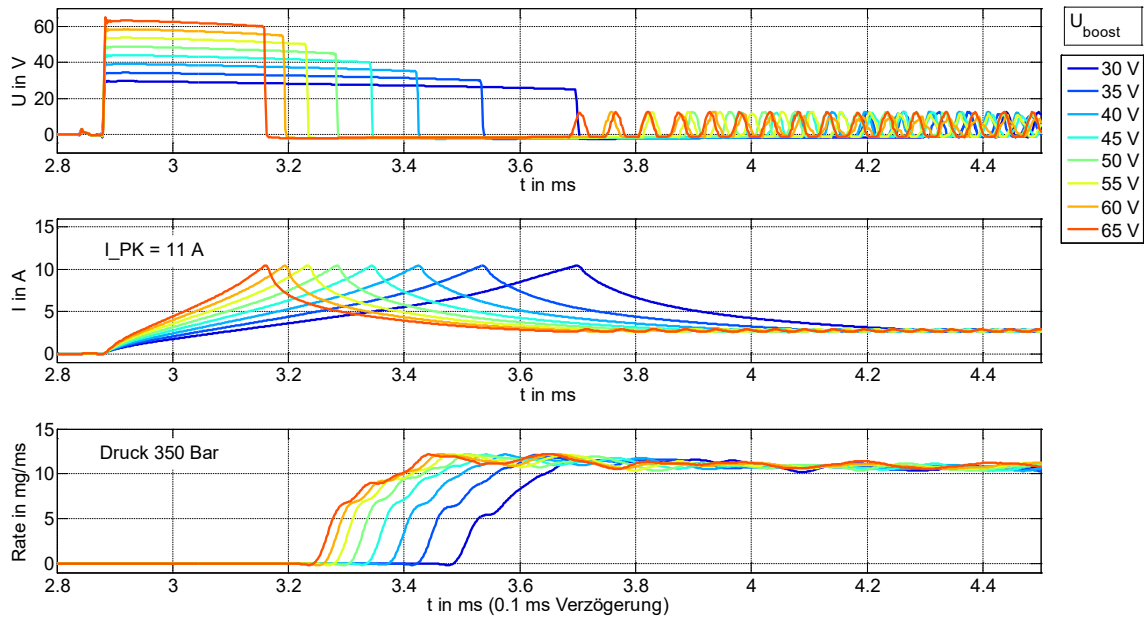
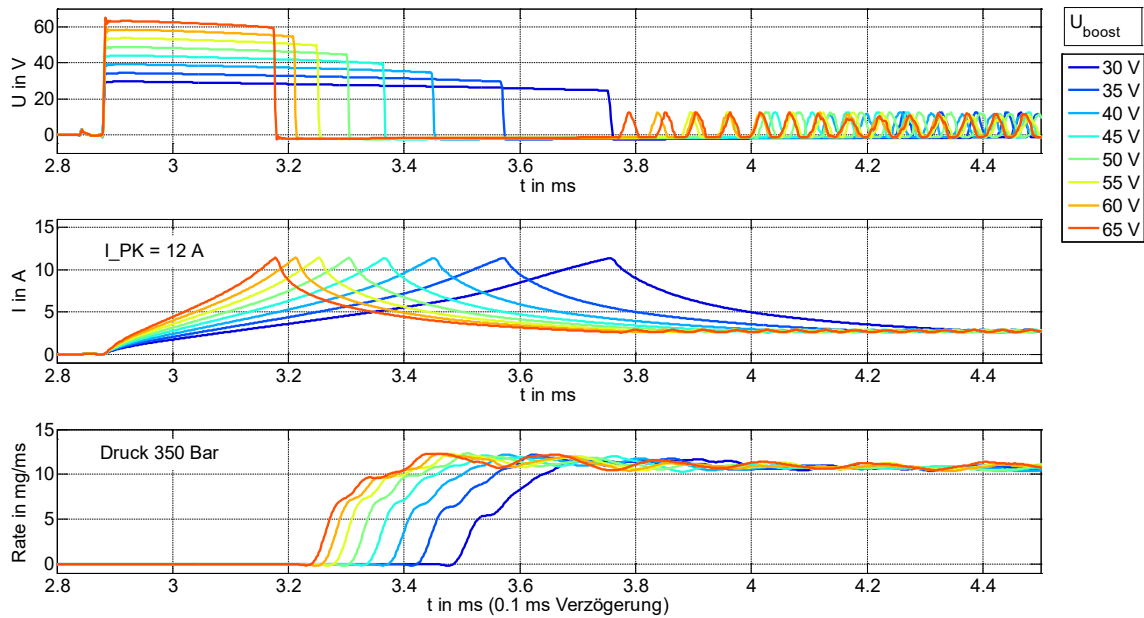


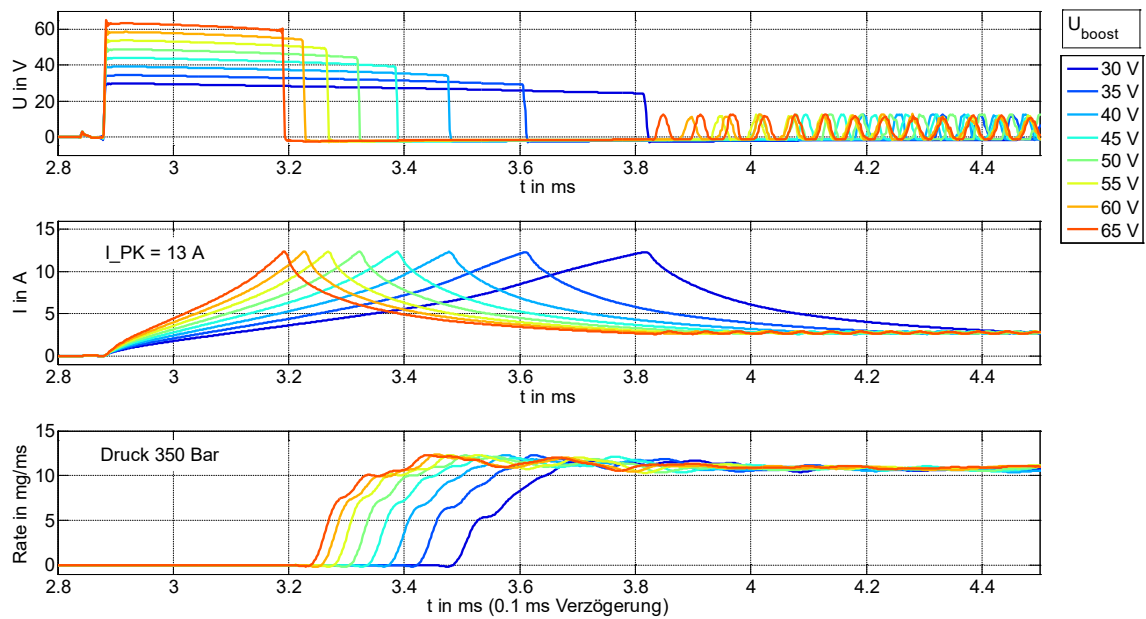
Abbildung 79: Ratenverlauf 10 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



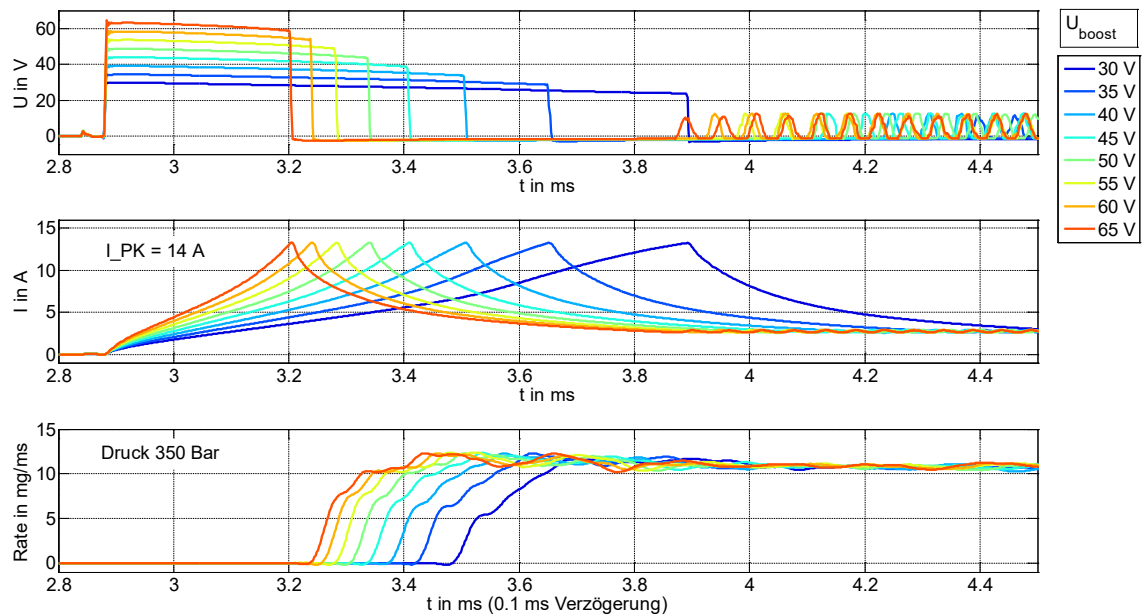
**Abbildung 80:** Ratenverlauf 11 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



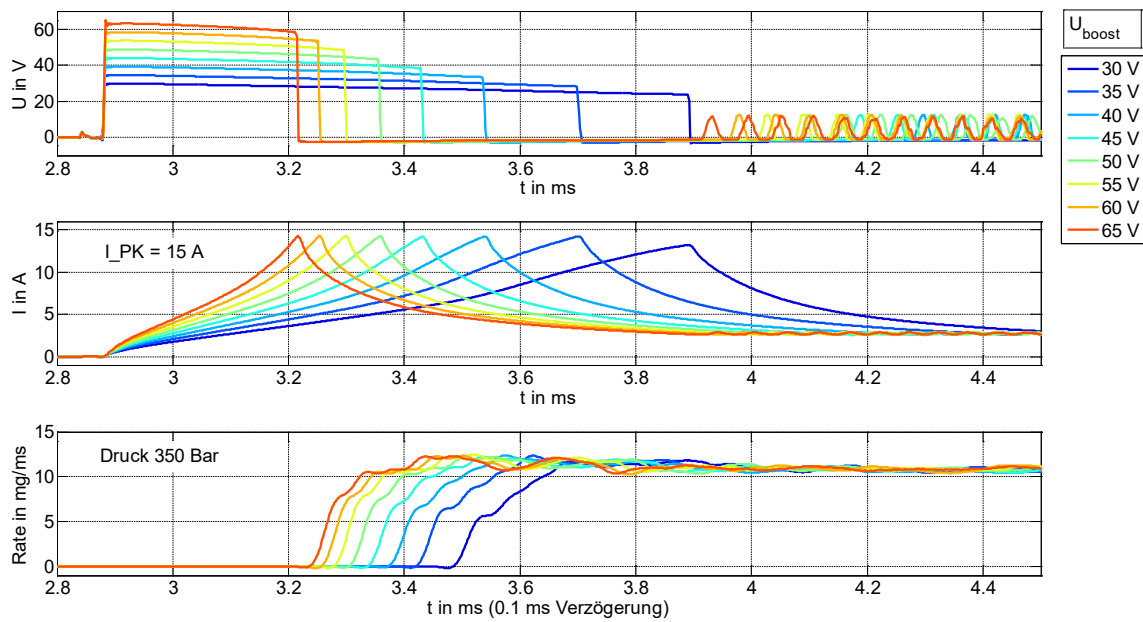
**Abbildung 81:** Ratenverlauf 12 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



**Abbildung 82:** Ratenverlauf 13 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung

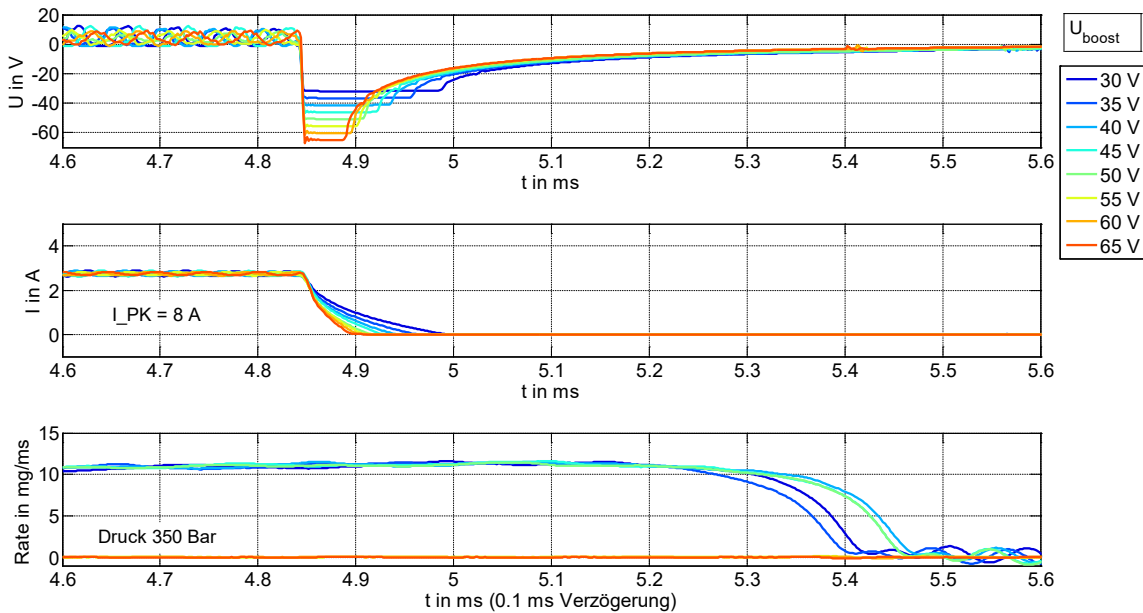


**Abbildung 83:** Ratenverlauf 14 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



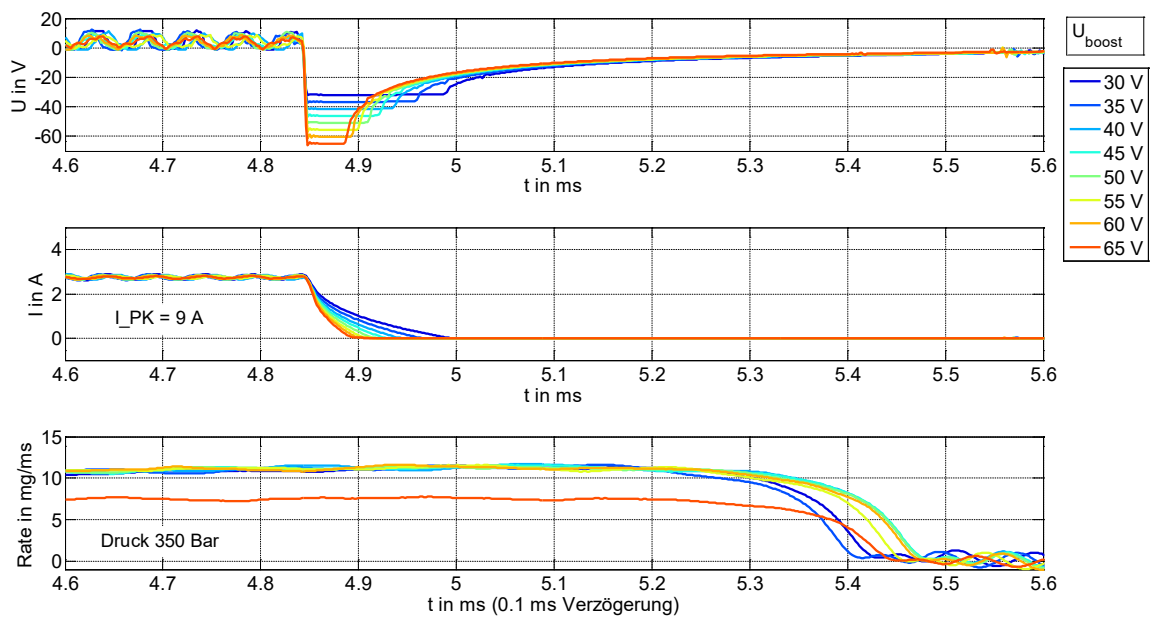
**Abbildung 84:** Ratenverlauf 15 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung

## 8.2 Einfluss der Abschaltspannung

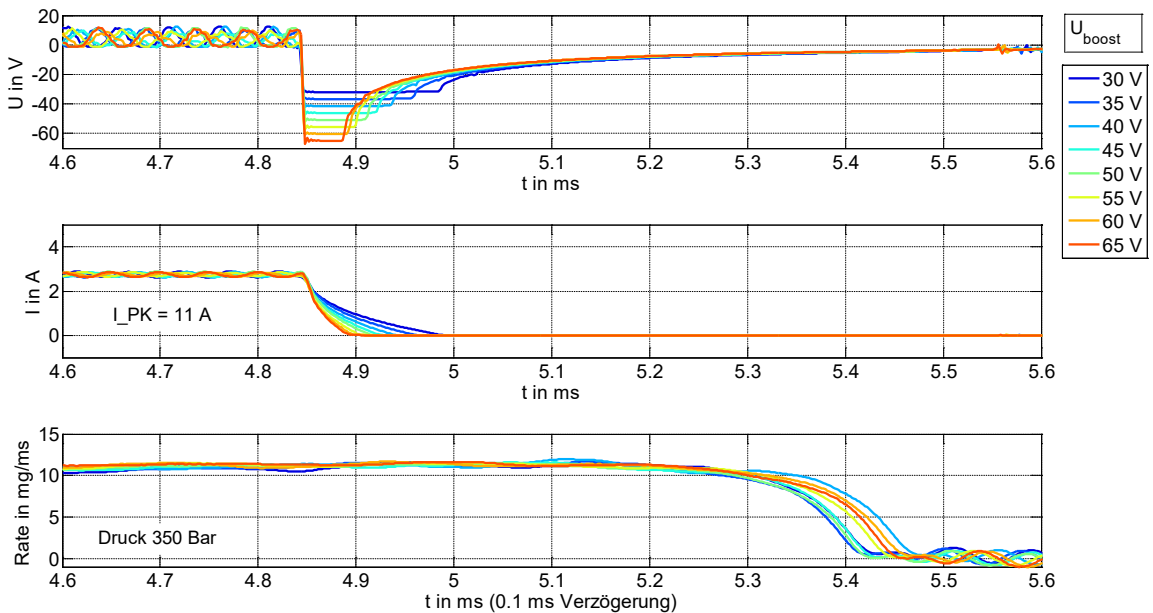


**Abbildung 85:** Ratenverlauf 8 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung

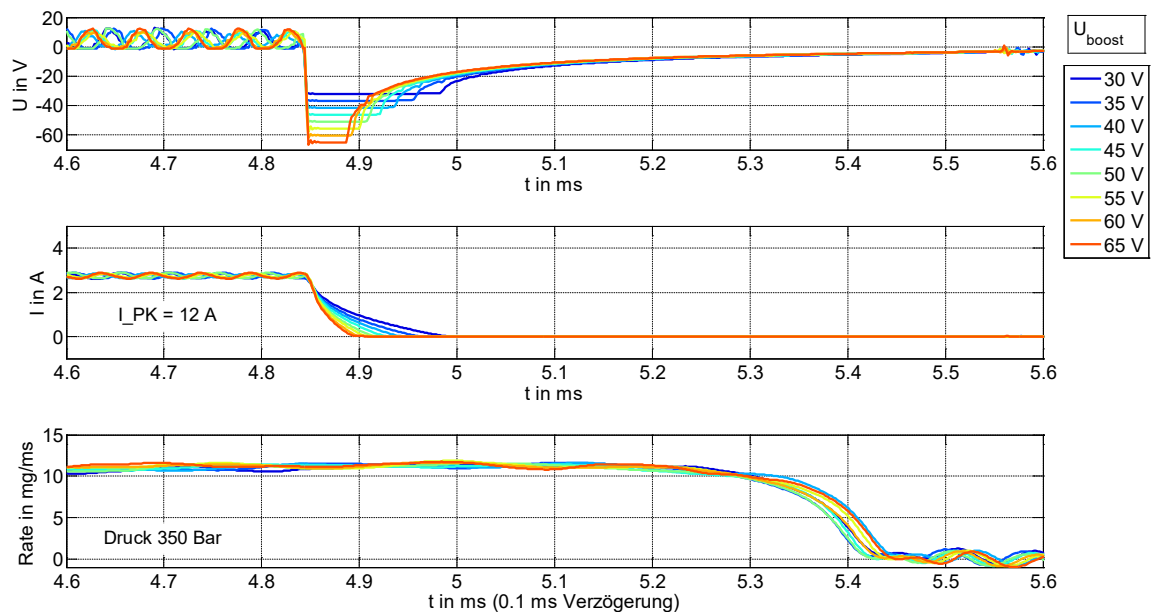




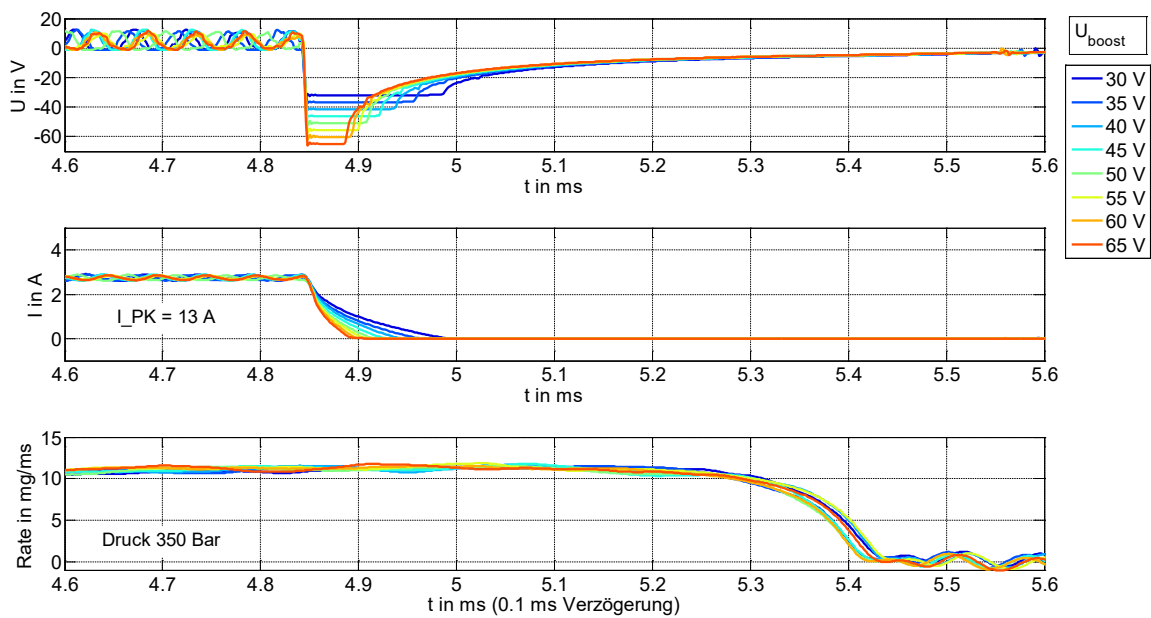
**Abbildung 86:** Ratenverlauf 9 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



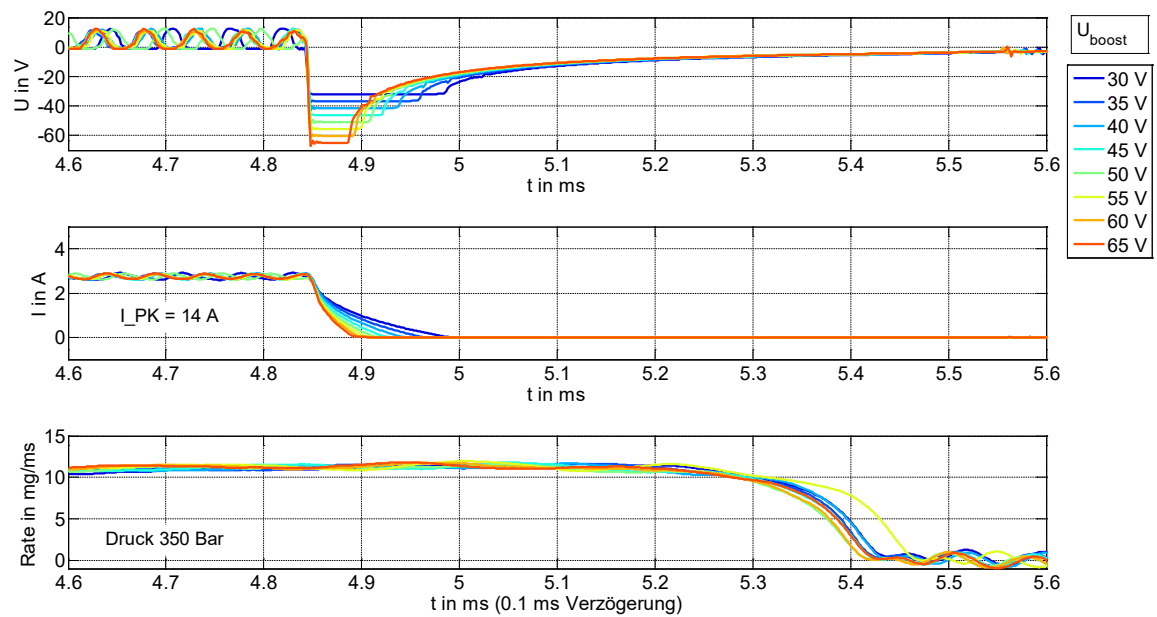
**Abbildung 87:** Ratenverlauf 11 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



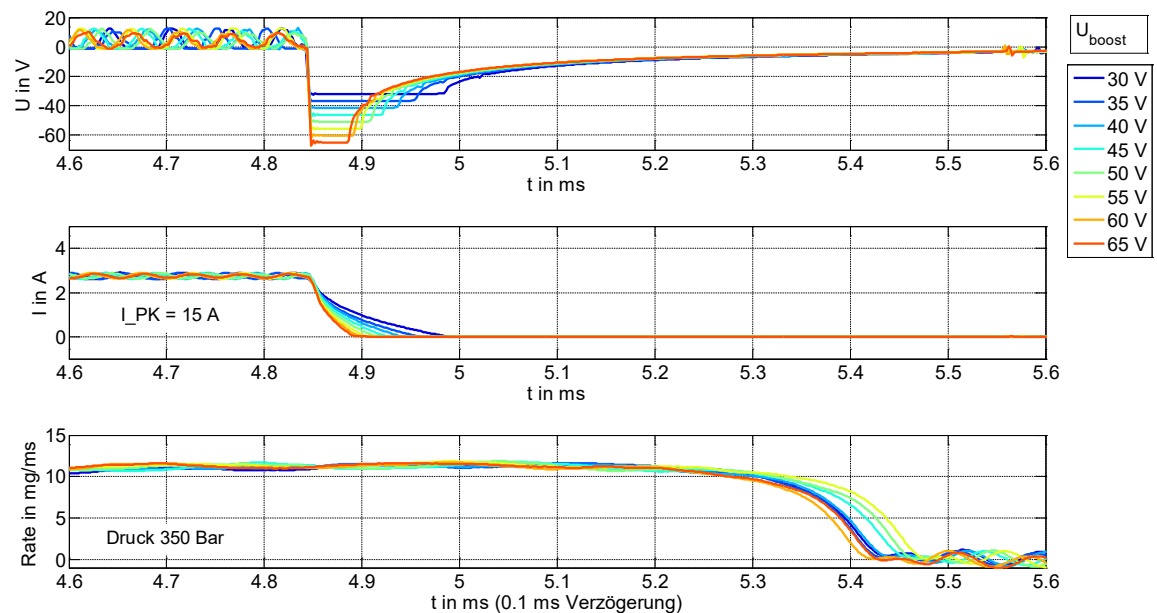
**Abbildung 88:** Ratenverlauf 12 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



**Abbildung 89:** Ratenverlauf 13 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



**Abbildung 90:** Ratenverlauf 14 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



**Abbildung 91:** Ratenverlauf 15 A Peakstrom in Abhängigkeit der Boostspannung



## 9. Literaturverzeichnis

- [Ald78] Aldefeld B. *A Numerical Solution of Transient Nonlinear Eddy-Current Problems Including Moving Iron Parts*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, No.5, 1978.
- [Ber92] Berberich R. *Positionserkennung bei einem Stellglied*. Offenlegungsschrift DE 41 18 975 A1, VDO Adolf Schindling AG, 1992.
- [Bec00] Becker U. *Verfahren zur Schätzung eines Nadelhubs eines Magnetventils*. Patentanmeldung DE 198 34 405 A 1, Robert Bosch GmbH, 2000.
- [Bel15] Belyaev N.; Denk F. u.a. *Verfahren und Vorrichtung zur Detektion von Betriebszuständen eines elektromagnetisch angetriebenen Gerätes*. Offenlegungsschrift WO 2015 / 039 953 A 1, Continental Automotive GmbH, 2015.
- [Ber32] Berliner A.; Scheel K., *Physikalisches Handwörterbuch*, zweite Auflage, Verlag Julius Springer, 1932
- [Ced07] Cedrat-Technologies, *NEW LINEAR MAGNETIC ACTATORS*, [http://www.cedrat-technologies.com/fileadmin/user\\_upload/cedrat\\_groupe/Technologies/Actuators/Magnetic%20actuators%20%26%20motors/fiche\\_AMA/Magnetostrictive\\_Actuators.pdf](http://www.cedrat-technologies.com/fileadmin/user_upload/cedrat_groupe/Technologies/Actuators/Magnetic%20actuators%20%26%20motors/fiche_AMA/Magnetostrictive_Actuators.pdf), (abgerufen am 03.02.2017)
- [Chr11] Christoffel J. *Continental readies super-precise solenoid injection for 2013*, SAE International, <http://articles.sae.org/9909/>, (abgerufen am 12.02.2017)
- [Con15] Continental Automotive GmbH *Powertrain Products*, Technical Information, 2015, [http://www.continental-automotive.com/www/download/automotive\\_de\\_en/general/powertrain/download/powertrain\\_products\\_en.pdf](http://www.continental-automotive.com/www/download/automotive_de_en/general/powertrain/download/powertrain_products_en.pdf), (abgerufen am 06.03.2017)
- [Den11] Denk F. *Bestimmen des Bewegungsverhaltens eines Kraftstoffinjektors basierend auf dem zeitlichen Abstand zwischen den ersten beiden Spannungspulsen in einer Haltephase*. Patentschrift DE 2011 076 113 B 4, Continental Automotive GmbH, 2011.
- DETERMINATION OF THE MOVEMENT BEHAVIOUR OF A FUEL INJECTOR ON THE BASIS OF THE TIME INTERVAL BETWEEN THE FIRST TWO VOLTAGE PULSES IN A HOLDING PHASE* Offenlegungsschrift WO 2012 156 241 A 3, Continental Automotive GmbH, 2011.

- [Den12a] Denk F. *Charakterisierung einer Bewegung eines Kraftstoffinjektors mittels Erfassung und Auswertung einer magnetischen Hysteresekurve*. Offenlegungsschrift DE 10 2010 063 009 A 1, Continental Automotive GmbH, 2010.
- [Den12b] Denk F. *Bestimmung des Standardserien-Öffnungsverhaltens eines Kraftstoffinjektors basierend auf einem Test-Öffnungsverhalten unter dem Einfluss eines Testpulses mit konstanter Spannung*. Patentschrift DE 10 2011 076 363 B 4, Continental Automotive GmbH, 2011.
- DETERMINATION OF THE STANDARD-SERIES OPENING BEHAVIOUR OF A FUEL INJECTOR ON THE BASIS OF A TEST OPENING BEHAVIOUR UNDER THE INFLUENCE OF A TEST PULSE WITH A CONSTANT VOLTAGE*, Offenlegungsschrift WO 2012 159 877 A 3, Continental Automotive GmbH, 2012.
- [Den13a] Denk F.; Rösel G. *Bestimmen des zeitlichen Bewegungsverhaltens eines Kraftstoffinjektors basierend auf einer Auswertung des zeitlichen Verlaufs von verschiedenen elektrischen Messgrößen*. Offenlegungsschrift DE 10 2012 205 573 A 1, Continental Automotive GmbH, 2013.
- Determining the Movement Behavior Over Time of a Fuel Injector on the Basis of an Evaluation of the Chronological Progression of Various Electrical Measurement Variables*, Offenlegungsschrift WO 2013 149 924 A 1, Continental Automotive GmbH, 2013; Offenlegungsschrift US 2015 152 830 A 1, Continental Automotive GmbH, 2013; Offenlegungsschrift KR 20150005911 A, Continental Automotive GmbH, 2013; Offenlegungsschrift CN 104185731 A, Continental Automotive GmbH, 2013.
- [Den13b] Denk F. *Ermittlung eines Zeitpunkts eines vorbestimmten Öffnungszustandes eines Kraftstoffinjektors*. Patentschrift DE 10 2013 214 412 B 4, Continental Automotive GmbH, 2013.
- Determination of The Point in Time of a Predetermined Open State of a Fuel Injector*, Offenlegungsschrift WO 2015 010 851 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift US 2016 160 784 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift KR 20160023840 A, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift CN 105378252 A, Continental Automotive GmbH, 2014.
- [Den14a] Denk F. *Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung eines Referenz-Stromverlaufs für einen Kraftstoffinjektor zur Ermittlung des Zeitpunkts eines vorbestimmten Öffnungszustandes eines Kraftstoffinjektors*. Patentschrift DE 10 2013 207 842 B 4, Continental Automotive GmbH, 2013.

*Method And Device For Determining A Reference Current Progression For A Fuel Injector, For Determining The Instant Of A Predetermined Opening State Of The Fuel Injector*, Offenlegungsschrift WO 2014 177 431 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift US 2016 102 628 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift KR 20160003162 A, Continental Automotive GmbH, 2014; Offenlegungsschrift CN 105143648 A, Continental Automotive GmbH, 2014.

[Den14b] Denk F. *Ermittlung des Zeitpunkts eines vorbestimmten Öffnungszustandes des Kraftstoffinjektors*. Offenlegungsschrift DE 10 2014 218 626 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014.

[Den14c] Denk F.; Belyaev N. u.a. *Verfahren und Einrichtung zur Detektion des Öffnungsbeginns einer Düsennadel*. Offenlegungsschrift DE 10 2014 206 430 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014.

[Den14d] Denk F. *Ermittlung des Zeitpunkts eines vorbestimmten Öffnungszustandes eines Kraftstoffinjektors*. Offenlegungsschrift WO 2014 / 154 449 A 1, Continental Automotive GmbH, 2014.

[Den15a] Denk F. *Vorrichtung und Verfahren zum Steuern eines Einspritzventils*. Patentschrift DE 10 2014 208 753 B 4, Continental Automotive GmbH, 2014.

*DEVICE AND METHOD FOR CONTROLLING AN INJECTION VALVE*, Offenlegungsschrift WO 2015 169 501 A 1, Continental Automotive GmbH, 2015, Offenlegungsschrift KR 20160149303 A, Continental Automotive GmbH, 2015.

[Den15b] Denk F. *Präzise Bestimmung des elektrischen Widerstands eines Kraftstoffinjektors mit Magnetspulenantrieb*. Patentschrift DE 10 2015 212 135 B 3, Continental Automotive GmbH, 2015.

*PRECISE DETERMINATION OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF A FUEL INJECTOR HAVING A SOLENOID DRIVE*, Offenlegungsschrift WO 2017 001 077 A 1, Continental Automotive GmbH, 2016.

[Den15c] Denk F. *Verfahren zum Ermitteln eines Referenzstromwertes zur Ansteuerung eines Kraftstoffinjektors*. Patentschrift DE 10 2015 210 794 B 3, Continental Automotive GmbH, 2015.

*METHOD FOR DETERMINING A REFERENCE CURRENT VALUE FOR ACTUATING A FUEL INJECTOR*, Offenlegungsschrift WO 2016 198 184 A 1, Continental Automotive GmbH, 2016.

- [Den15d] Denk F. *Ermitteln eines Zeitpunkts eines vorbestimmten Öffnungszustandes eines Kraftstoffinjektors*. Patentschrift DE 10 2015 207 954 B 3, Continental Automotive GmbH, 2015.
- DETERMINATION OF A POINT IN TIME OF A PREDETERMINED OPEN STATE OF A FUEL INJECTOR*, Offenlegungsschrift WO 2016 173 844 A 1, Continental Automotive GmbH, 2016.
- [Den15e] Denk F. *Vereinfachte Ansteuerung eines Kraftstoffinjektors*. Offenlegungsschrift DE 10 2015 212 739 A 1, Continental Automotive GmbH, 2015.
- [Den15f] Denk F. *Ansteuerung von Kraftstoffinjektoren bei Mehrfacheinspritzung*. Patentschrift DE 10 2015 209 566 B 3, Continental Automotive GmbH, 2015.
- ACTUATION OF FUEL INJECTORS FOR MULTIPLE INJECTIONS*, Offenlegungsschrift WO 2016 188 668 A 1, Continental Automotive GmbH, 2016.
- [Den16] Denk F. *System Integration of Solenoid Injectors for Direct Injection Gasoline Engines*, Ilmenauer Magnetttag, Juni 2016.
- [Den17] Denk F. *Systembeschreibung für direkteinspritzende Ottomotoren und elektromagnetische Ansteuerstrategien*, Symposium Elektromagnetismus Ostfildern, Februar 2017.
- [Dew17] Dewetron, <https://www.dewetron.com/>, (abgerufen am 22.02.2017).
- [Duk09] Dukart A.; u.a. *Einspritzventil*, Offenlegungsschrift DE10 2009 055 045 A 1, Robert Bosch GmbH, 2009.
- [Cas89] Cassing W.; Stanek W. *Elektromagnetische Wandler und Sensoren*. 2. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Expert Verlag, 1989.
- [Eur70] EUR-Lex *Richtlinie 70/220/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur74] EUR-Lex *Richtlinie 74/290/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31974L0290&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur77] EUR-Lex *Richtlinie 77/102/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31977L0102&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).



- 
- [Eur78] EUR-Lex *Richtlinie 78/665/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31978L0665&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur83] EUR-Lex *Richtlinie 83/351/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31983L0351&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur88] EUR-Lex. *Richtlinie 88/76/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31988L0076&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur91] EUR-Lex. *Richtlinie 91/441/EWG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0441&rid=2>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur96] EUR-Lex. *Richtlinie 96/69/EG*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0069&rid=2>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur98] EUR-Lex. *Richtlinie 98/69/EG*. [http://eur-lex.europa.eu/re-source.html?uri=cellar:9ee5d16b-1a4a-4a72-ac90-5e3a0bb1d745.0004.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/re-source.html?uri=cellar:9ee5d16b-1a4a-4a72-ac90-5e3a0bb1d745.0004.02/DOC_1&format=PDF), (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur07] EUR-Lex. *Richtlinie 715/2007*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715&rid=2>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Eur12] EUR-Lex. *Richtlinie 459/2012*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0459&rid=1>, (abgerufen am 19.03.2016).
- [Fis76] Fischer J. *Elektrodynamik*. Ein Lehrbuch, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1976.
- [Ger89] Gerthsen C; Kneser H. u.a., Physik, S.741, 16. Auflage, Springer-Verlag, 1989
- [Gla97] Glavmo M.; Larson M. u.a. *Method and Arrangement for controlling and detecting the position of solenoid detected*. Patentanmeldung WO 94 13 991 A 1, PI RESEARCH LTD, 1997.
- [Gla08] Glasmachers H. *Elektronische Verfahren zur Optimierung der Dosiereigenschaften von Kfz-Magneteinspritzventilen*. Ph.D.thesis, Ruhr-Universität Bochum, 2008.

- [Glö12] Glötzl M.; Denk F. u.a. *Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen der Wicklungstemperatur eines Injektors*. Offenlegungsschrift DE 10 2012 218 327 A 1, Continental Automotive GmbH, 2012.
- [Her08] Herrmann M. *Entwurf, Berechnung und Regelung magnetischer Reluktanz-aktuatoren*. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [Heu95] Heuck F.; Macherauch E., *Forschung mit Röntgenstrahlen*, Springer-Verlag, 1995
- [Hoa06] Hoang A.; Boee M. u.a. *Verfahren zur Steuerung wenigstens eines Magnetventils*. Patentanmeldung DE 10 2006 016 892 A 1, Robert Bosch GmbH, 2006.
- [Hon95] Hong H. *Optimum Performance of Solenoid Injectors for Direct Injection of Gaseous Fuels in IC Engines*. Ph.D.thesis, Concordia University, 1995.
- [Imo13] Imoehl W., *Fuel Injection System Trends and Emissions Implications*. Continental Automotive Systems Newport News, SAE Technical Paper, 2013.
- [Inc16] ETAS INCA.  
[http://www.etas.com/de/products/inca\\_software\\_products.php](http://www.etas.com/de/products/inca_software_products.php), (abgerufen am 10.11.2016).
- [Inf07] Infineon AG, *TC1796 32-Bit Single-Chip Microcontroller User's Manual, V2.0, July 2007*. [http://www.infineon.com/dgdl/tc1796\\_um\\_v2.0\\_2007\\_07.pdf?fileId=db3a304412b407950112b41bc4972cb1](http://www.infineon.com/dgdl/tc1796_um_v2.0_2007_07.pdf?fileId=db3a304412b407950112b41bc4972cb1), (abgerufen am 24.03.2016).
- [Inf16a] Infineon AG, *Gasoline Direct Injection. Typical partitioning for GDI discrete & solenoid*. <http://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/powertrain/gasoline-direct-injection/>, (abgerufen am 24.03.2016).
- [Inf16b] Infineon AG, *Delta Sigma Demodulator*. [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-DSD-XMC4000-AP32302-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4624e765da5014ed901e8851b1f](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-DSD-XMC4000-AP32302-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4624e765da5014ed901e8851b1f)<http://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/powertrain/gasoline-direct-injection/>, (abgerufen am 19.12.2016).
- [Kaj93] Kajima T. *Development of a High-Speed Solenoid Valve-Investigation of the Energizing Circuits*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 40, No. 4, 1993.
- [Kaj95] Kajima T.; Kawamura Y. *Development of a High-Speed Solenoid Valve-Investigation of Solenoids*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 42, No. 1, 1995.

- 
- [Kal12] Kallenbach E.; Eick R. u.a.: *Elektromagnete. Grundlage, Berechnung, Entwurf*. 4.Auflage, Teubner Vieweg Verlag, 2012.
- [Kei04] Keilig R. *Entwurf von schnellschaltenden (hochdynamischen) neutralen Elektromagnetsystemen*. Ph.D.thesis, Technische Universität Ilmenau, 2004.
- [Ken16] Kendrion Maghyst. [http://www.stz-mtr.de/stz-mtr/de/maghyst-de/publikationen-de/item/magnetische-messung-neue-wege-der-funktionspruefung?category\\_id=2](http://www.stz-mtr.de/stz-mtr/de/maghyst-de/publikationen-de/item/magnetische-messung-neue-wege-der-funktionspruefung?category_id=2), (abgerufen am 10.11.2016).
- [Kes59a] Kesavamurthy N.; Rajagopalan P. *Eddy Currents in Solid Iron due to Alternating Magnetic Flux*. *The Institution of Electrical Engineers*. Monograph No. 339U, 621.318.424.014.4, 1959.
- [Kes59b] Kesavamurthy N.; Rajagopalan P. *Eddy Currents in Solid Iron due to Impact Excitation*. *The Institution of Electrical Engineers*. Monograph No. 336U, 621.318.424:621.313.1, 1959.
- [Kes61] Kesavamurthy N.; Rajagopalan P. *Effects of Eddy Currents on the Rise and Decay on Flux in Solid Magnetic Cores*. *The Institution of Electrical Engineers*. Monograph No. 463U, 621.3.042.13, 1961.
- [Kua90] Kuan-Ya Y.; Shih-Chou C. *A New Algorithm for Coupled Solutions of Electric, Magnetic, and Mechanical Systems in Dynamic Simulation of Solenoid Actuators*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.26, No.3, 1990.
- [Lei00] Liber T.; Kallenbach M. *Verfahren zur sensorlosen Ermittlung der Geschwindigkeit und Position elektromagnetischer Stellsysteme*. Patentanmeldung DE 100 33 923 A 1, LSP Innovative Automotive Systems GmbH, 2000.
- [Leq89] Lequesne B. *Fast-Acting, Long Stroke Solenoids with two Springs*, IEEE 89CH2792-0/89/0000-0195\$01.00, 1989.
- [Leq90] Lequesne B. *Dynamic Model of Solenoids under Impact Excitation, Including Motion and Eddy Currents*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 2, 1990.
- [Lev14] Levin C. *Charakterisierung von weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen für den Einsatz in Traktionsantrieben*. Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [Loc90] Locher J.; Siebert H. u.a. *Verfahren zur Steuerung und Erfassung der Bewegung eines elektromagnetischen Schaltorgans*. Patentanmeldung DE 38 43 138 A 1, Robert Bosch GmbH, 1990.

- 
- [Mat16] MathWorks *MATLAB*. <https://de.mathworks.com/>, (abgerufen am 10.11.2016).
- [Max16] ANSYS *Maxwell*. <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell>, (abgerufen am 10.11.2016).
- [Mie13] Miersch-Wiemers O.; Christ A.; Herynek R. *Future Powertrain and Required Engine Technology*. Robert Bosch GmbH, SAE Technical Paper, Farmington Hills MI, 2013.
- [Mos03] Moseler O.; Straky H. *Verfahren zur Rekonstruktion der Ankerbewegung eines elektromagnetischen Aktuators*. Patentanmeldung DE 100 34 830 C2, Isermann Rolf, 2003.
- [Mum94] Mumford J. *ELECTROMAGETIC VALVES*. Patentanmeldung WO 94 13 991 A 1, PI RESEARCH LTD, 1994.
- [Nor09] LV124: *Elektrische und elektronische Komponenten in Kraftfahrzeugen bis 3,5t – Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen*. Version 1.3, 2009.
- [Oli13] Olin P. *Direct Injection Fuel Control Strategies to Meet LEVIII / Tier III*. Delphi Corporation, SAE Technical Paper, 2013.
- [Ons16] Onsemi *MOSFETs*, <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/parameters.do?id=809&blockId=12083>, (abgerufen am 19.12.2016).
- [Paw05] Pawelczak D. *Nutzung inhärenter Messeffekte von Aktuatoren und Methoden zur sensorlosen Positionsmessung im Betrieb*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2005.
- [Poh49] Pohl R. *Rise of Flux due to Impact Excitation: Redardation by Eddy Currents in Solid Parts. Digests of Papers Part II of the Proceedings*. Paper No. 776, 621.313.1.042.013.8, 1949.
- [Poh14] Pohlmann, J; Abel, J. u.a. *Elektromagnetisch betätigbares Ventil*, Patentanmeldung EP 2 806 150 B 1, Robert Bosch GmbH, 2014
- [Pir99] Piron M. *Dynamic Analysis of Fast-Acting Solenoid Actuators*. Ph.D.thesis, University of Glasgow, 1999.
- [Rad11] Radler O. *Ein Beitrag zur Messung statischer und dynamischer Eigenschaften von elektro-magneto-mechanische Energiewandlern und deren Komponenten*. Ph.D.thesis, TU Ilmenau, 2011.

- 
- [Rei11a] Reif K.; Dietsche K. u.a. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Robert Bosch GmbH, Vieweg Teubner Verlag, 27. Auflage, Seite 569, 2011.
- [Rei11b] Reif K. *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*. Robert Bosch GmbH, Vieweg Teubner Verlag, Sechste Auflage, Seite 19, 2011.
- [Rob13] Robert Bosch GmbH *High-pressure solenoid injector HDEV5*. [http://www.bosch.co.jp/tms2015/en/products/pdf/Bosch\\_di\\_folder\\_HDEV5.pdf](http://www.bosch.co.jp/tms2015/en/products/pdf/Bosch_di_folder_HDEV5.pdf), (abgerufen am 19.12.2016).
- [Ros11] Rosenbaum S. *Entwurf elektromagnetischer Aktoren unter Berücksichtigung von Hysterese*, Dissertation, Universitätsverlag Ilmenau; Technische Universität Ilmenau, 2011.
- [Sch97a] Schmitz G.; Schrey E. *Verfahren zur Anpassung einer Steuerung für einen elektromagnetischen Aktuator*. Patentanmeldung DE 195 33 452 A 1, FEV Motorentechnik GmbH, 1997.
- [Sch97b] Schrey E.; Kather L. *Verfahren zur Erkennung des Ankerauftreffens an einem elektromagnetisch betätigbaren Stellmittel*. Patentanmeldung DE 195 33 452 A 1, FEV Motorentechnik GmbH, 1997.
- [Sch99] Schmitt F.; Wendorff W.; Westerholz K. *Embedded-Control-Architekturen*. ISBN 3-446-19573-4, Hanser Verlag München Wien, 1999.
- [Sch06] Schultz A. W. *Simulationsgestützter Entwurf elektromagnetischer Linearaktuatoren für fluidtechnische Ventile*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2006.
- [Sim89] Simonyi K. *Theoretische Elektrotechnik*. 9. Auflage, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1989.
- [Smi80] Smith D.; Spinweber D. *A General Model for Solenoid Fuel Injector Dynamics*. Delphi Corporation, SAE Technical Paper 10.4271/800508, 1980.
- [Sta12] Staples S. *PhD Transfer Report Using Magnetostriction and the Villari Effect to detect Anomalies in Steel Materials*, 2012
- [Ste60] Stephen G.; Woodward Curtis; Hartman A. *FUEL SUPPLY SYSTEM*. Patentschrift US 29 48 272 A, Bendix Aviation Corporation, 1960.
- [Str02] Ströhla T. *Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethod*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2002.
- [Sub64] Subba V. *Equivalent circuit of solid iron core for impact excitation problems*. PROC. IEE, Vol. 111, No. 2, 1964.

- 
- [Sun02] Sunwoo M.; Kang J. *Nadelhub-Abschätzvorrichtung einer Kraftstoffeinspritzdüse mit gemeinsamer Druckleitung*. Patentschrift DE 102 20 388 A1, Hyundai Motor Company, 2002.
- [The91] Thelen U.; Hirth T. *Verfahren zur Bewegungs- und Ladezustandserkennung eines durch magnetische Wechselwirkung zwischen zwei Endpositionen beweglichen Bauteils eines induktiven elektrischen Verbrauchers*. Patentanmeldung DE 39 42 836 A 1, Daimler- Benz Aktiengesellschaft, 1991.
- [Thu16] Thurbly Thunder Instruments TTI CPX200. [http://www.farnell.com/datasheets/1724091.pdf?\\_ga=1.198321772.2105883181.1482172762](http://www.farnell.com/datasheets/1724091.pdf?_ga=1.198321772.2105883181.1482172762), (abgerufen am 19.12.2016).
- [Tie93] Tietze U.; Schenk Ch. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Seite 569-570, 1993.
- [Ulm07] Ulm J. *Optimierung von schnellwirkenden elektromagnetischen Antrieben*. Dissertation, Verlag ISLE; Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [Vol17] Volkswagen AG, *Rekuperation*, <http://www.volkswagen.de/de/technologie/technik-lexikon/rekuperation.html>, (abgerufen am 13.02.2017)
- [Wan10] Wang Y.; Liu X. u.a. *The Optimal Drive Current of Solenoid Valve and its Effect on Fuel Injection Characteristics*, IEEE, 2010.
- [Wei96] Weimer J.; Feick S. *Gerät zur Lageerkennung von elektromagnetischen Stelleinrichtungen*. Patentanmeldung DE 38 43 138 A 1, Robert Bosch GmbH, 1996.
- [Win00] Winkes G.; Lueues H. *Lagemessung eines in einer Magnetspule betätigten Magnetankers*. Patentanmeldung DE 199 10 497 A 1, Robert Bosch GmbH, 2000.

